

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Modelování a simulace pohonu s trojfázovým
asynchronním motorem v programu Matlab-
Simulink**

**Modelling and Simulation of 3-phases Induction
Motor Drive in Matlab-Simulink**

2014

Martin Pavlíček

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Pavlíček**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T015 Elektronika

Téma: Modelování a simulace pohonu s trojfázovým asynchronním motorem v programu Matlab-Simulink
Modelling and Simulation of 3-phases Induction Motor Drive in Matlab-Simulink

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor možností matematického popisu trojfázového asynchronního motoru
2. Vytvoření matematického trojsložkového modelu asynchronního motoru
3. Sestavení simulačního trojsložkového modelu asynchronního motoru
4. Sestavení matematického a simulačního modelu napětového střídače
5. Simulační ověření pohonu – porovnání chování dvojsložkového a trojsložkového modelu asynchronního motoru při napájení harmonickým napětím a z napětového střídače

Seznam doporučené odborné literatury:

ČERNÝ M.: Elektrické pohony II. VUT Brno 1979.

FIRAGO, B.I., PAVJAČIK, L. B.: Teorie elektroprivoda. ZAO „Těchnoperspektiva“ Minsk 2004. ISBN 985-6591-20-1.

FIRAGO, B.I., PAVJAČIK, L. B.: Regulirujemyje elektroprivody přeměnného toka. ZAO „Těchnoperspektiva“ Minsk 2006. ISBN 985-6591-37-6.

NEBORÁK, I.: Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů. Monografie, VŠB-TU Ostrava 2002, 172 stran, ISBN 80-248-0083-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

7. května 2014


.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velice rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivu Neborákovi, CSc. za odborné konzultace a rady, které mi pomohly při vypracování této diplomové práce. Rád bych poděkoval i rodičům za podporu při studiu.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá především sestavením a vytvořením trojsložkového modelu asynchronního motoru v programu Matlab-Simulink. Nejprve jsou v práci rozebrány možnosti matematického popisu trojfázového asynchronního motoru. Následně je pak v práci řešeno sestavení napájení pro konkrétní sestavený trojsložkový model. A to napájení z napěťového střídače pomocí obdélníkového řízení, pak s pulsní šířkovou modulací.

V poslední části této práce je simulační ověření pohonu, a to jak mnou vytvořeného trojsložkového modelu, tak i zadaného dvojsložkového modelu. Toto ověřování a simulování je prováděno pro dva typy napájení ze střídače, a to pro obdélníkové řízení a pro pulsní šířkovou modulaci. Při těchto napájení se pak porovnávají vybrané výstupní hodnoty dvojsložkového a trojsložkového modelu asynchronního motoru. Porovnávání výsledků těchto dvou vytvořených modelů probíhá jak vizuálně, tak i přesným měřením v simulaci.

Klíčová slova

Asynchronní motor, simulační model napájení, obdélníkové řízení, pulsní šířková modulace, trojsložkový model, simulace, Matlab-Simulink

ABSTRACT

This thesis mainly deals with the establishment and creation of three-component model of induction motor in Matlab- Simulink. At first, the thesis discussed the possibility of a mathematical description of three-phase asynchronous motor. Subsequently work is dealt of establishment power for specific build three-component model. This is power from a voltage inverter using rectangular control, followed by a pulse-width modulation.

In the last part of this work is the simulation verification drive, three-component model created from me and given two-component model. This verification and simulation is performed for two types of power inverters, for a rectangular control and pulse width modulation. At these power then compare the selected output value of two-component and three-component model of induction motor. Comparing results of these two models are created visually and accurate measurement in simulation.

Keywords

Induction motor, simulation model of power, rectangular control, pulse width modulation, three-component model, simulation, Matlab-Simulink

Seznam použitých symbolů a zkratek:

AM – asynchronní motor

PWM – pulsní šířková modulace

f	[Hz]	frekvence
i	[A]	proud
J	[kg.m ²]	moment setrvačnosti
k	[-]	poměr indukčností
L	[H]	indukčnost
M	[H]	vzájemná indukčnost
M	[N.m]	moment
n	[ot/min]	otáčky
p	[-]	počet pólových dvojic
R	[Ω]	odpor
t	[s]	čas
u, U	[V]	napětí
σ	[-]	činitel rozptylu
ψ	[Wb]	tok
ω	[rad/s]	elektrická úhlová rychlost
ω_m	[rad/s]	mechanická úhlová rychlost

Indexy:

a	statorová nebo rotorová fáze a
b	statorová nebo rotorová fáze b
c	statorová nebo rotorová fáze c
d	stejnoseměrné
e	elektromagnetický
m	mechanický
p	pilové
r	rotorový, referenční
s	statorový
α	reálná osa statorového souřadného systému
β	imaginární osa statorového souřadného systému

OBSAH

1	Úvod	6
2	Možnosti matematického popisu trojfázového asynchronního motoru	7
2.1	Obecné předpoklady	7
2.2	Rovnice pro matematický tokový model	7
3	Vytvoření matematického trojsložkového modelu asynchronního motoru	9
3.1	Rovnice pro proudový model	9
3.2	Transformace 3/2 a zpětná transformace	10
4	Sestavení simulačního trojsložkového modelu asynchronního motoru	12
4.1	Zadávaní parametrů motoru	12
4.2	Vytvoření vnitřní struktury	14
4.2.1	Jednotlivé části vnitřní struktury	16
5	Sestavení matematického a simulačního modelu napěťového střídače	18
5.1	Napěťový střídač s obdélníkovým řízením	18
5.2	Napěťový střídač s pulsní šířkovou modulací (PWM)	20
6	Simulační ověření pohonu	22
6.1	Výsledky simulace – napájení ze střídače pomocí PWM	22
6.1.1	Výsledky simulace pro dvojsložkový AM – napájení pomocí PWM	23
6.1.2	Výsledky simulace pro trojsložkový AM – napájení pomocí PWM	26
6.2	Výsledky simulace – napájení ze střídače s obdélníkovým řízením	29
6.2.1	Výsledky simulace pro dvojsložkový AM – střídač s obdélníkovým řízením	30
6.2.2	Výsledky simulace pro trojsložkový AM – střídač s obdélníkovým řízením	33
6.3	Měření přesných hodnot v simulaci	36
6.4	Detailnější průběhy simulace	37
6.4.1	Detaily průběhů při napájení ze střídače s PWM	37
6.4.2	Detaily průběhů při napájení ze střídače s obdélníkovým řízením	39
6.5	Průběhy při zatížení	41
6.5.1	Průběhy při zatížení – napájení pomocí PWM	42
6.5.2	Průběhy při zatížení – napájení pomocí obdélníkového řízení	43
6.6	Zhodnocení simulací	45
7	Závěr	46
	Použitá literatura	47

1 Úvod

Asynchronní stroje se užívají nejčastěji jako motory. Jsou nejrozšířenějšími elektromotory vůbec a používají se k nejrůznějším pohonům hlavně proto, že jsou ze všech elektromotorů nejjednodušší (hlavně jednoduchost při výrobě) a nejlevnější. Jsou zároveň provozně nejspolehlivější a vyžadují velmi malé nároky na údržbu oproti jiným typům motorů. Využívají se pro pohony zařízení, jako jsou čerpadla, ventilátory, pásové dopravníky, jeřáby, výtahy, obráběcí stroje a mnoho dalších.[4]

Asynchronní stroj se skládá ze dvou hlavních částí, ze statoru a rotoru. Mezi těmito částmi je pak mezera, obvykle vzduchová, která by měla být co nejmenší. Obě části asynchronního stroje jsou opatřeny vinutím, přičemž obvykle vinutí statorové je připojeno na zdroj střídavého proudu. Rotorové vinutí je pak spojeno nakrátko a proud se v něm vytváří pomocí elektromagnetické indukce. Což je podobné jako u transformátoru, a proto se někdy používá pro asynchronní stroj označení indukční stroj.[7]

V této diplomové práci jsem se zaměřil především na simulaci asynchronního motoru v programu Matlab, přesněji pak na jeho simulační část Simulink, kde se simulace provádí pomocí výběru a zapojení jednotlivých bloků z knihovny a lze tak sestavit skutečný obvod a zkoumat jeho chování.

Simulace se používá hlavně proto, že mnohé motory pracují nepřetržitě a tak jejich odpojení pro vyzkoušení nových možností, je často nemožné. Simulací si tak jednoduše zjistíme, jak se daný motor bude chovat při nastavení určitých podmínek (např. změna typu řízení, zvýšení či snížení určitého parametru, atd.) nebo zda nedojde k poškození motoru.

Měl jsem za úkol nejprve obecně rozebrat možnosti řízení asynchronního motoru, poté sestavit podle rovnic matematický a simulační model trojsložkového asynchronního motoru. Následně pak sestavit blok pro řízení, konkrétně pro obdélníkové řízení.

Po sestavení celého modelu, včetně připojení napájení a vložení i dvojsložkového modelu asynchronního motoru do schématu, jsem zkoumal, jak se liší či neliší výstupní hodnoty obou modelů motorů.

Výstupní hodnoty z modelů jsem pak porovnával jak vizuálně, tak i pomocí přesných hodnot z měřících bloků. Veškeré měření bylo prováděno pro dva typy napájení, a to pro obdélníkové řízení a pro napájení pomocí pulsní šířkové modulace.

2 Možnosti matematického popisu trojfázového asynchronního motoru

2.1 Obecné předpoklady

Asynchronní motor lze obecně považovat za nelineární, mnohparametrovou soustavu. Kdybychom chtěli tuto mnohparametrovou soustavu matematicky popsat, došli bychom ke značně složitému matematickému popisu. Proto se obvykle při sestavování matematického popisu uvažuje s těmito zjednodušujícími předpoklady:

- a) Stroj je symetrický, jeho vinutí je sinusově rozloženo po obvodu stroje a vzduchová mezera je konstantní
- b) Nulový vodič není připojen
- c) Ztráty v železe jsou zanedbány
- d) Odpor a indukčnosti jsou stejné ve všech fázích a je konstantní, tj. zanedbávají se následující parametry:
 - změny odporů statoru a rotoru na teplotě
 - nasycení magnetického obvodu
 - hystereze magnetického obvodu
 - změny odporů a indukčností na kmitočtu (skinefekt)

Taktéž uvažujeme při řešení přechodových dějů, že zanedbáme činný odpor a indukčnost napájecího zařízení (napájecí síť, měnič, přívody atd.) [5]

Matematický model trojsložkového asynchronního motoru se dá rozdělit na dva hlavní typy, a to na proudový model a tokový model.

Tato diplomová práce se zabývá a zkoumá možnosti pomocí proudového modelu – **bod 3.1**, tokový model a jeho rovnice zde budou odhaleny (**v kapitole 2.2**) jen okrajově, simulován zde však nebude.

2.2 Rovnice pro matematický tokový model

Při tomto modelu se vychází ze základních napěťových rovnic:

$$u_{sa} = i_{sa}R_s + \frac{d\Psi_{sa}}{dt} \quad u_{sb} = i_{sb}R_s + \frac{d\Psi_{sb}}{dt} \quad u_{sc} = i_{sc}R_s + \frac{d\Psi_{sc}}{dt} \quad (2.1 - 1,2,3)$$

$$0 = i'_{ra}R'_r + \frac{d\Psi_{ra}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\Psi_{rb} - \Psi_{rc}) \quad (2.1 - 4)$$

$$0 = i'_{rb}R'_r + \frac{d\Psi_{rb}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\Psi_{rc} - \Psi_{ra}) \quad (2.1 - 5)$$

$$0 = i'_{rc}R'_r + \frac{d\Psi_{rc}}{dt} + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\Psi_{ra} - \Psi_{rb}) \quad (2.1 - 6)$$

Pro moment v tokovém modelu pak platí vztah:

$$M = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_M [(i_{sa} i'_{rc} + i_{sb} i'_{ra} + i_{sc} i'_{rb}) - (i_{sa} i'_{rb} + i_{sb} i'_{rc} + i_{sc} i'_{ra})] \quad (2.1 - 7)$$

Jednotlivé satorové a rotorové toky jsou pak rovny:

$$\Psi_{sa} = L_{sa} i_{sa} - \frac{L_M}{2} i_{sb} - \frac{L_M}{2} i_{sc} + L_M \left(i'_{ra} - \frac{1}{2} i'_{rb} - \frac{1}{2} i'_{rc} \right) \quad (2.1 - 8)$$

$$\Psi_{sb} = L_{sb} i_{sb} - \frac{L_M}{2} i_{sc} - \frac{L_M}{2} i_{sa} + L_M \left(i'_{rb} - \frac{1}{2} i'_{rc} - \frac{1}{2} i'_{ra} \right) \quad (2.1 - 9)$$

$$\Psi_{sc} = L_{sc} i_{sc} - \frac{L_M}{2} i_{sa} - \frac{L_M}{2} i_{sb} + L_M \left(i'_{rc} - \frac{1}{2} i'_{ra} - \frac{1}{2} i'_{rb} \right) \quad (2.1 - 10)$$

$$\Psi_{ra} = L_{ra} i_{ra} - \frac{L_M}{2} i'_{rb} - \frac{L_M}{2} i'_{rc} + L_M \left(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) \quad (2.1 - 11)$$

$$\Psi_{rb} = L_{rb} i_{rb} - \frac{L_M}{2} i'_{rc} - \frac{L_M}{2} i'_{ra} + L_M \left(i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} - \frac{1}{2} i_{sa} \right) \quad (2.1 - 12)$$

$$\Psi_{rc} = L_{rc} i_{rc} - \frac{L_M}{2} i'_{ra} - \frac{L_M}{2} i'_{rb} + L_M \left(i_{sc} - \frac{1}{2} i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} \right) \quad (2.1 - 13)$$

kde pro jednotlivé indukčnosti v tokovém modelu platí:

$$L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_M + L_{s\sigma} = L_{s\phi} \quad (2.1 - 14)$$

$$L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = L_M + L_{r\sigma} = L_{r\phi} \quad (2.1 - 15)$$

U tokového modelu se s výhodou využívá zápisu do matic. Následné simulační výpočty jsou potom značně obsáhlé a časově náročné (oproti výpočtům při proudovém modelu).

Rovnice spřažených magnetických toků však mohou být ještě značně složitější, protože magnetický tok vinutí jedné fáze se vytváří pomocí výsledného účinku všech proudů stroje.

Rovnice jsou nelineární a obsahují pak, mimo již uvedené časově proměnlivé proudy, i součiny kosinusové funkce polohově proměnlivého úhlu ν . [3]

3 Vytvoření matematického trojsložkového modelu asynchronního motoru

V předchozí kapitole je okrajově popsán tokový model. Pro vytvoření vnitřní struktury trojsložkového modelu jsem ale vycházel z rovnic 3.1 – 1 až 22 pro proudový model.

3.1 Rovnice pro proudový model

Pro jednotlivé statorové a rotorové proudy platí následující rovnice, které uvažují se vstupními napájecími napětími u_{sa} , u_{sb} , u_{sc} :

$$\frac{di_{sa}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sa} - i_{sa} R_s + k_r e_a'') \quad (3.1 - 1)$$

$$\frac{di_{sb}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sb} - i_{sb} R_s + k_r e_b'') \quad (3.1 - 2)$$

$$\frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} (u_{sc} - i_{sc} R_s + k_r e_c'') \quad (3.1 - 3)$$

$$\frac{di_{ra}'}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_r} [k_s (u_{sa} - i_{sa} R_s) + e_a''] \quad (3.1 - 4)$$

$$\frac{di_{rb}'}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_r} [k_s (u_{sb} - i_{sb} R_s) + e_b''] \quad (3.1 - 5)$$

$$\frac{di_{rc}'}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_r} [k_s (u_{sc} - i_{sc} R_s) + e_c''] \quad (3.1 - 6)$$

Moment v proudovém modelu pak vychází z rovnic:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_{PM}) \quad (3.1 - 7)$$

$$M_e = -p \cdot L_h (i_{sa} i_{rcb} + i_{sb} i_{rac} + i_{sc} i_{rba}) \quad (3.1 - 8)$$

Pro výsledné sestavení konečného modelu a stanovení všech potřebných hodnot, je pak potřeba znát i následující pomocné rovnice:

$$e_a'' = i_{ra}' R_r' + \omega (L_h i_{scb} + L_r i_{rcb}) \quad (3.1 - 9)$$

$$e_b'' = i_{rb}' R_r' + \omega (L_h i_{sac} + L_r i_{rac}) \quad (3.1 - 10)$$

$$e_c'' = i_{rc}' R_r' + \omega (L_h i_{sba} + L_r i_{rba}) \quad (3.1 - 11)$$

Statorové a rotorové sdružené proudy:

$$i_{scb} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{sb} - i_{sc}) \quad (3.1 - 12)$$

$$i_{sac} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{sc} - i_{sa}) \quad (3.1 - 13)$$

$$i_{sba} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{sa} - i_{sb}) \quad (3.1 - 14)$$

$$i_{rcb} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i'_{rb} - i'_{rc}) \quad (3.1 - 15)$$

$$i_{sac} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i'_{rc} - i'_{ra}) \quad (3.1 - 16)$$

$$i_{sba} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i'_{ra} - i'_{rb}) \quad (3.1 - 17)$$

Elektrická rychlost je rovna:

$$\omega = p \cdot \omega_m \quad (3.1 - 18)$$

Pro výše uvedené vztahy pak potřebujeme znát ještě poslední vztahy pro indukčnosti L_s , L_r , L_h , pro konstanty k_r a k_s a pro činitel rozptylu σ .

$$L_s = L_h + L_{s\sigma} \quad (3.1 - 19)$$

$$L_r = L_h + L_{r\sigma} \quad (3.1 - 20)$$

$$L_h = \frac{3}{2}L_M \quad (3.1 - 21)$$

$$k_r = \frac{L_h}{L_r} \quad (3.1 - 22)$$

$$k_s = \frac{L_h}{L_s} \quad (3.1 - 23)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_h^2}{L_s L_r} \quad (3.1 - 24)$$

3.2 Transformace 3/2 a zpětná transformace

Jelikož byla potřeba převést hodnoty fázových napětí U_a , U_b , U_c na složky U_α a U_β , musela se v modelu použít Parkova transformace 3 na 2.

Rovnice Parkovy transformace pro získání konkrétní napětí U_α a U_β :

$$u = u_\alpha + ju_\beta = \frac{2}{3} \left(u_a + u_b e^{\frac{j2\pi}{3}} + u_c e^{\frac{j4\pi}{3}} \right) = |u| e^{j\varepsilon} \quad (3.2 - 1)$$

$$= \frac{2}{3} \left(u_a + u_b \left(\frac{\cos 2\pi}{3} + j \frac{\sin 2\pi}{3} \right) + u_c \left(\frac{\cos 4\pi}{3} + j \frac{\sin 4\pi}{3} \right) \right) \quad (3.2 - 2)$$

$$= \frac{1}{3} (2u_a - u_b - u_c) + \frac{j\sqrt{3}}{3} (u_b - u_c) \quad (3.2 - 3)$$

tj.

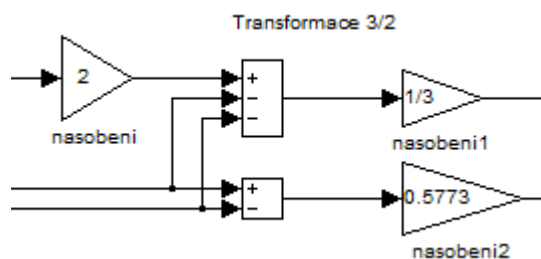
$$u_\alpha = \frac{1}{3} (2u_a - u_b - u_c) \quad (3.2 - 4)$$

$$u_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3} (u_b - u_c) \quad (3.2 - 5)$$

Pokud jsou splněny podmínky symetrie, tj. $u_a + u_b + u_c = 0$, tak

$$u_\alpha = u_a \quad (3.2 - 6)$$

$$u_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}(0,5u_a + u_b) \quad (3.2 - 7)$$



Obrázek 3.1 Blok transformace 3/2 ve vytvořeném modelu

Ve schématu taktéž potřebujeme i zpětnou transformaci 2 na 3, jelikož na výstupu máme i_{sa} a i_{sb} a pro porovnávání potřebujeme jednotlivé fázové proudy i_{sa} , i_{sb} a i_{sc} . To provedeme pak podle následujících rovnic:

$$i_a = i_\alpha + i_0 \quad (3.2 - 8)$$

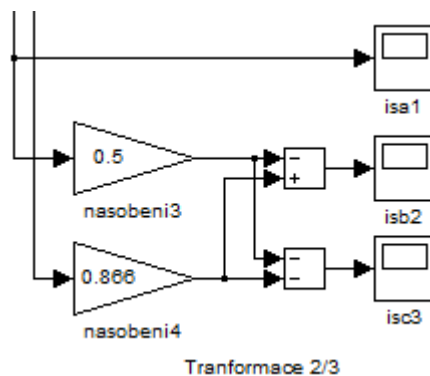
$$i_b = \left(-\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \right) + i_0 \quad (3.2 - 9)$$

$$i_c = \left(-\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \right) + i_0 \quad (3.2 - 10)$$

kde i_0 je nulová složka a je svázána s fázovými hodnotami podle vztahu

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (3.2 - 11)$$

Pokud však jsou splněny podmínky symetrie, tak se nulová složka neuplatní.



Obrázek 3.2 Blok pro zpětnou transformaci 2/3 ve vytvořeném modelu

4 Sestavení simulačního trojsložkového modelu asynchronního motoru

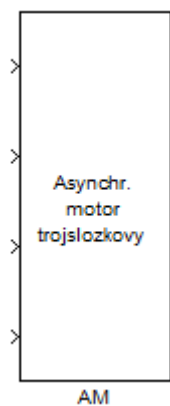
4.1 Zadávání parametrů motoru

Pro sestavení modelu motoru v simulaci bylo potřeba znát parametry asynchronního motoru uvedené v **tabulce 4.1**.

Jmenovité statorové napětí U_n	380V
Frekvence f	50Hz
Odpor fáze statoru R_s	2,1Ω
Odpor fáze rotoru R_r	2,51 Ω
Rozptylová indukčnost fáze statoru L_s	0,008 H
Rozptylová indukčnost fáze rotoru L_r	0,008 H
Magnetická indukčnost M	0,129 H
Jmenovitý moment setrvačnosti J	0,043 kgm ²
Počet polpárů p	2

Tabulka 4.1 Zadané parametry asynchronního motoru

Blok motoru uvedený na **obrázku 4.1** je výsledný, mnou vytvořený model trojsložkového asynchronního motoru. Má čtyři vstupy a pět výstupů. Tři vstupy jsou pro napájení, a to pro napětí U_{sa} , U_{sb} a U_{sc} . Poslední vstup je pro přivedení zatěžovacího momentu M_{pm} . Na výstupech jsou pak statorové proudy i_{sa} , i_{sb} a i_{sc} , dále pak výstup úhlové rychlosti ω a jako poslední je výstup momentu M_e .



Obrázek 4.1 Vytvořený blok trojsložkového asynchronního motoru

Do tohoto bloku lze pak pomocí dialogového okna vepsat parametry zadaného motoru a spustit pak následně simulaci přímo pro můj případ. Nabídka dialogového okna je pak na **obrázku 4.2**.

Function Block Parameters: AM3

as. motor (mask)
Asynchronni motor - trojslozkovy

Parameters

Rs [ohm] =
2.1

Rr (prepocteny na stator) [ohm] =
2.51

Lh [H] =
0.129

Ls_sigma [H] =
0.008

Lr_sigma (prepocteny na stator) [H] =
0.008

Jc [kgm²] =
0.043

p (pocet polparu)
2

OK Cancel Help Apply

Obrázek 4.2 Dialogové okno modelu pro zadávání parametrů – již s nastavenými parametry

Vytvořený blok trojsložkového asynchronního motoru dále umožňuje i změnu vnitřních proměnných (díky možnosti „Edit Mask“ => editace masky bloku), které jsou potřebné při výpočtech a nejsou nadefinovány přímo ve vytvořené vnitřní struktuře. V bloku je taktéž možné změnit počet a název parametru dialogového okna, avšak je potřeba brát v potaz to, že pokud si uživatel sám změní zejména název či dokonce počet zadaných parametrů, blok může pracovat nesprávně či úplně přestat vykonávat svou funkci a hlásit tak chybové zprávy.

Jako poslední možnost je zde i možnost vytvoření si vlastní nápovědy pro vytvořený blok. V mém případě jsem pak v nápovědě pro mnou vytvořený blok vypsál, čemu jsou přiřazeny jednotlivé vstupy a jaké veličiny se pak objevují na výstupu. Pokud si tak uživatel vyžádá nápovědu pro tento blok, objeví se mu přímo v prostředí mnou vytvořená nápověda, a tak bude mít přehled jaký signál kam přivést.

Díky všem těmto možnostem má vytvořený blok asynchronního motoru stejné možnosti, jako jiný blok pocházející přímo z knihovny programu.

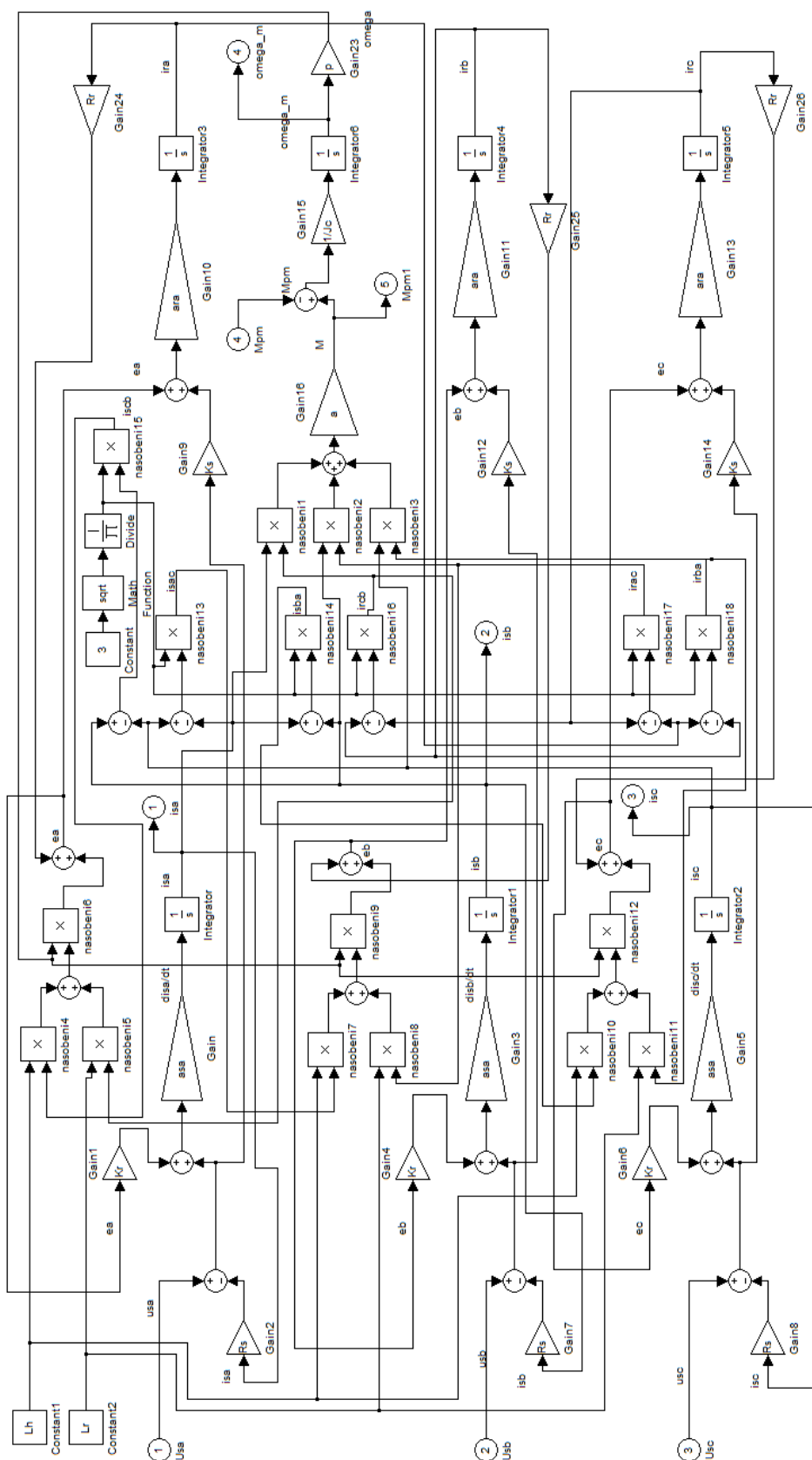
4.2 Vytvoření vnitřní struktury

Podle rovnic **rovnice 3.1 – 1 až 22** jsem vytvořil celou novou vnitřní strukturu trojsložkového asynchronního motoru. Ta je nakonec velice rozsáhlá a je zobrazena na **obrázku 4.3**.

V zapojení je možno vidět porty (piny) číslo 1,2,3 a 4 pro přivedení signálu a piny v pořadí 1,2,3,4 a 5 pro výstupní signály z obvodu. To pak odpovídá vstupům a výstupům bloku na **obrázku 4.1**.

Ostatní bloky v obvodu jsou pak použity a zapojeny podle rovnic, aby byla splněna správná činnost bloku. Obvod obsahuje bloky pro násobení, dělení, sumační či rozdílové členy, dále pak zesilovací prvky s pevně nastavenými hodnotami, integrační členy a sestavu tří bloků pro nastavení třetí odmocniny do jmenovatele zlomku.

Jednotlivá bloková schémata, přibližující tak postupnou tvorbu vnitřní struktury bloku, jsou zobrazena v **kapitole 4.2.1**.

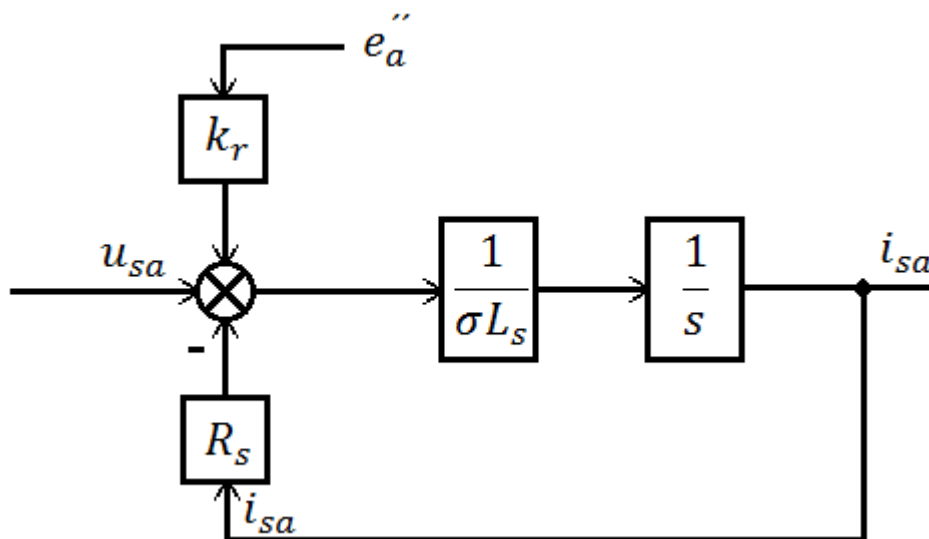


Obrázek 4.3 Vytvořená vnitřní struktura pro trojsložkový asynchronní motor

4.2.1 Jednotlivé části vnitřní struktury

V této podkapitole jsou uvedena bloková schémata pro jednotlivé části celkové vnitřní struktury. Jelikož jsou strukturně blokové schémata totožné a liší se jen přivedenými nebo nastavenými parametry, uvedu zde vždy příklad blokového schématu pro jednu fázi, konkrétně vždy pro fázi a .

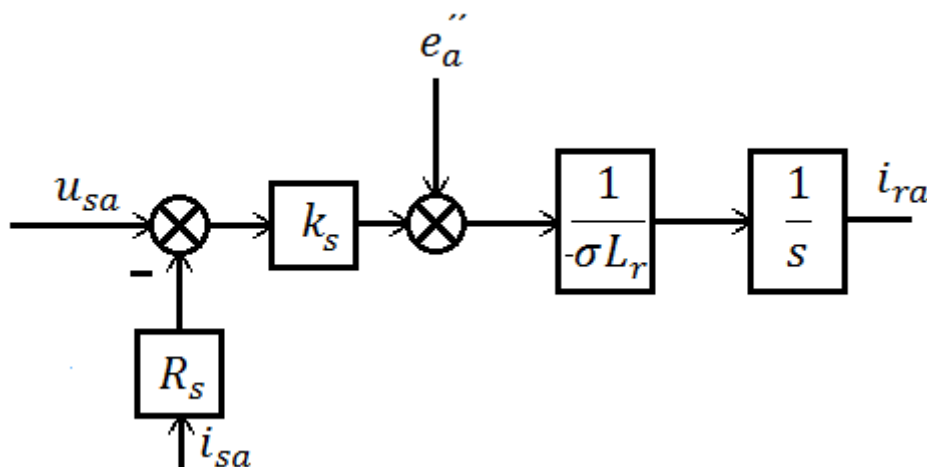
Jako první jsem vytvořil blokové schéma pro vstupní napětí u_{sa} (podle **rovnice 3.1 – 1**)



Obrázek 4.4 Blokové schéma vstupní struktury – fáze a

Toto blokové schéma obsahuje integrační člen, podílový člen, dále pak dva členy pro nastavení konstant a sumačně-rozdílový člen. V schématu si můžeme všimnout i záporné zpětné vazby, které zlepšuje vlastnosti obvodu.

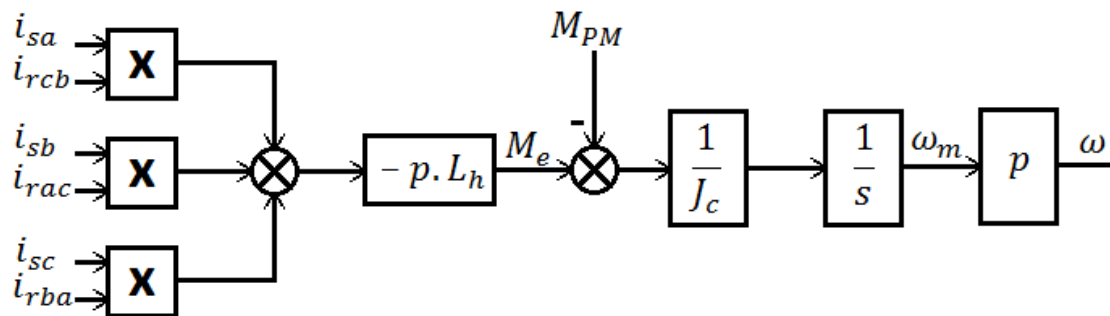
Podle **rovnice 3.1 – 4** bylo vytvořeno blokové schéma pro výstupní proud i_{ra} :



Obrázek 4.5 Blokové schéma výstupní struktury – fáze a

V tomto schématu jsou taktéž dva členy pro nastavení konstant, dále integrační člen, podílový člen, sumační a rozdílový člen.

Pro výsledný moment M , elektrickou ω a mechanickou ω_m rychlost je pak blokové schéma následující (rovnice 3.1 – 7,8 a 18):



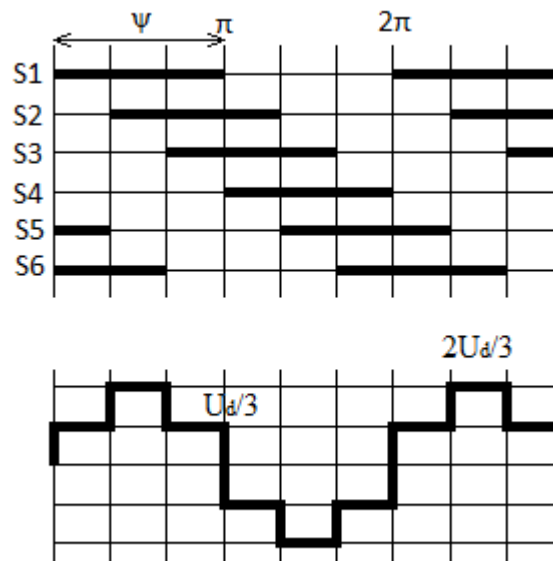
Obrázek 4.6 Blokové schéma pro určení momentu M_e , elektrické rychlosti ω a mechanické rychlosti ω_m

Na vstupu tohoto blokového schématu je násobené jednotlivých vyznačených proudů, které získáme ze zapojení ve vnitřní struktuře. Tyto proudy sečteme (opět sumační člen) a vynásobíme konstantou $-p.L_h$ abychom dostali elektromagnetický moment M_e . Po integraci členem $1/s$ dostaneme mechanickou rychlost ω_m a pokud tuto hodnotu vynásobíme konstantou p , dostaneme elektrickou rychlost ω , kterou ve vnitřní struktuře přivádíme zpět do obvodu.

5 Sestavení matematického a simulačního modelu napět'ového střídače

V simulacích budu používat dva typy napájení ze střídače, a to s obdélníkovým řízením a s pulsní šířkovou modulací.

5.1 Napět'ový střídač s obdélníkovým řízením



Obrázek 5.1 Princip obdélníkového řízení

Na **obrázku 5.1** je znázorněn princip obdélníkového řízení, který vychází z šesti pulsního zapojení střídače. Velikost výstupního napětí je závislá na velikosti programovatelného úhlu ψ , který může nabývat hodnot v rozmezí od $\pi/3$ až do $\pi-\gamma$, kde γ je bezpečnostní úhel. To je doba, která musí být dostačující k tomu, aby se součástka dokázala vypnout. Pokud máme kvalitní a rychlé spínací prvky, potřebujeme pak kratší dobu na vypnutí, čili máme i menší bezpečnostní úhel.

Protože spínací prvky ve střídači nespínají a nevypínají okamžitě (vlivem komutace) nesmí se nastavit programovatelný úhel ψ na hodnotu π . Hrozilo by totiž to, že by se v jedné větvi spínací prvek nestačil vypnout ještě před tím, než by se sepnul druhý spínací prvek. Tento stav je označován jako zkrat a je nežádoucí, jelikož by v něm došlo ke zničení střídače.

V simulaci v této práci, ale uvažujeme s ideálními podmínkami, respektive s ideálními polovodičovými (spínacími) prvky, které mají:

- nulový odpor v sepnutém stavu
- nekonečný odpor v rozepnutém stavu
- okamžité spínání (rozepínání) spínacího prvku = ideální komutace

Pro nasimulování funkce střídače s obdélníkovým řízením jsem použil blok Matlab Function Embedded, který umožňuje vepsat program přímo do tohoto bloku a nemusí se tak odkazovat na externí m-file s programem, který musel být na stejné zdrojové cestě, kde byl jako uložený obvod. Pokud taky použijeme tento blok, nemusíme taky již používat multiplexery na vstupech a demultiplexery na výstupech, jelikož tento blok po vepsání programu do něj, zobrazí přímo možné vstupy a výstupy a ty pak lze přímo spojit se schématem.

Program jsem vepisoval pro každou fázi zvlášť podle následujícího algoritmu, kdy byla pro každou fázi vždy nastavena počáteční nulová podmínka.

Algoritmus jsem si rozdělil zvlášť pro kladnou větev:

$$\text{pokud } u_{ra} > \sin 0^\circ \text{ a zároveň } u_{ra} < \sin 60^\circ \text{ pak } u_a = \frac{u_d}{3} \quad (5.1 - 1)$$

$$\text{pokud } u_{ra} > \sin 60^\circ \text{ a zároveň } u_{ra} > \sin 0^\circ \text{ pak } u_a = \frac{2u_d}{3} \quad (5.1 - 2)$$

A zvlášť pro zápornou větev:

$$\text{pokud } u_{ra} < \sin 0^\circ \text{ a zároveň } u_{ra} > \sin -60^\circ \text{ pak } u_a = -\frac{u_d}{3} \quad (5.1 - 3)$$

$$\text{pokud } u_{ra} < \sin 0^\circ \text{ a zároveň } u_{ra} < \sin -60^\circ \text{ pak } u_a = -\frac{2u_d}{3} \quad (5.1 - 4)$$

Uvedený algoritmus je pro fázi *a*, obdobně lze ale podle těchto rovnic vytvořit i spínací režimy pro zbylé dvě fáze.

Podle rovnic 5.1-1 až 4 je pak vytvořen program, který je vepsaný přímo do bloku:

```
%napetovy stridac s obdelnikovym rizenim
% vystupy - fazova napeti Ua,Ub,Uc
% vstupy - Ura,Urb,Urc - jednotlivá referencni napeti
% Ud - stejnosmerne napeti meziobvodu

function [Ua,Ub,Uc] = str_obd_riz(Ura,Urb,Urc,Ud)

Ua=0;

if Ura>sin(0)&&Ura<(0.866)
    Ua=Ud*(1/3)
end;
if Ura>(0.866)&&Ura>sin(0)
    Ua=Ud*(2/3)
end;
if Ura<sin(0)&&Ura>(-0.866)
    Ua=-Ud*(1/3)
end;
if Ura<sin(0)&&Ura<(-0.866)
    Ua=-Ud*(2/3)
end;

Ub=0;
```

```

if      Urb>sin(0) &&Urb<(0.866)
    Ub=Ud*(1/3)
end;
if      Urb>(0.866) &&Urb>sin(0)
    Ub=Ud*(2/3)
end;
if      Urb<sin(0) &&Urb>(-0.866)
    Ub=-Ud*(1/3)
end;
if      Urb<sin(0) &&Urb<(-0.866)
    Ub=-Ud*(2/3)
end;

Uc=0;

if      Urc>sin(0) &&Urc<(0.866)
    Uc=Ud*(1/3)
end;
if      Urc>(0.866) &&Urc>sin(0)
    Uc=Ud*(2/3)
end;
if      Urc<sin(0) &&Urc>(-0.866)
    Uc=-Ud*(1/3)
end;
if      Urc<sin(0) &&Urc<(-0.866)
    Uc=-Ud*(2/3)
end;

```

Na vstup bloku střídače s obdélníkovým řízením jsou přivedena jednotlivá referenční napětí, která jsou vytvořena a složena z jednotlivých bloků. Detailnější popis je těchto vstupních bloků je v **kapitole 6.2**.

5.2 Napěťový střídač s pulsní šířkovou modulací (PWM)

Pro simulaci funkce střídače s pulsní šířkovou modulací (PWM) jsem použil blok Matlab Function Embedded, stejně jako v předchozím případě, při obdélníkovém řízení.

V této simulaci je použita komparační šířková modulace s uvažováním konstantní hodnoty U_d . Vstupní zadávací veličinou pro modulaci jsou pak přímo hodnoty generovaných sinusových napětí v jednotlivých fázích. Ty jsou komparovány (porovnávány) s pilovitým napětím U_p o kmitočtu 1kHz z generátoru pily. Na základě výsledků komparace jsou pak spínány tranzistory tak, že vytvoří pulzní průběh napětí na svorkách motoru.

Stanovení výstupního napětí v matematickém modelu v rámci simulačního programu Matlab-Simulink vychází z okamžitých průběhů napětí při spínání tranzistorů. To je dáno porovnáváním tří referenčních – řídicích napětí u_{ra} , u_{rb} , u_{rc} s jediným pilovitým napětím U_p přiváděným z generátoru pily. V případě, že je řídicí napětí pro danou fázi (větev) větší než napětí pily, spíná horní spínač příslušné větve, v opačném případě spíná spodní.[6]

$$\text{pokud } u_{ra} \geq u_p \text{ pak } u_{a0} = \frac{U_d}{2} \text{ jinak } u_{a0} = -\frac{U_d}{2} \quad (5.2 - 1)$$

$$\text{pokud } u_{rb} \geq u_p \text{ pak } u_{b0} = \frac{U_d}{2} \text{ jinak } u_{b0} = -\frac{U_d}{2} \quad (5.2 - 2)$$

$$\text{pokud } u_{rc} \geq u_p \text{ pak } u_{c0} = \frac{U_d}{2} \text{ jinak } u_{c0} = -\frac{U_d}{2} \quad (5.2 - 3)$$

Na základě těchto pomocných napětí u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} (majících význam napětí mezi příslušnou výstupní svorkou měniče a středu napětí U_d stejnosměrného meziobvodu) stanovíme okamžité hodnoty fázových napětí dle následujících vztahů:[5]

$$u_a = \frac{2u_{a0} - u_{b0} - u_{c0}}{3} \quad (5.2 - 4)$$

$$u_b = \frac{2u_{b0} - u_{a0} - u_{c0}}{3} \quad (5.2 - 5)$$

$$u_c = \frac{2u_{c0} - u_{b0} - u_{a0}}{3} \quad (5.2 - 6)$$

Do vytvořeného bloku střidače tak vstupují referenční (řídící napětí) u_{ra} , u_{rb} , u_{rc} , kde modulační amplitudy těchto napětí jsou nastaveny na hodnotu 0,95, frekvence f těchto signálů je stanovena na 50 Hz a tato jednotlivá napětí jsou mezi sebou fázově posunuta o 120° . Dalším vstupem je pak vytvořený generátor pily U_p , který má amplitudu $\pm 1V$ a frekvence f tohoto signálu je nastavena na 1kHz. Jako poslední vstup je U_d signál, který představuje stejnosměrnou složku napětí v meziobvodu.

Výstup tohoto bloku pak tvoří tři fázová napětí U_a , U_b a U_c .

Podle rovnic **5.2-1 až 6** je pak vytvořen program, který je vepsaný přímo do bloku:

```
%napetovy stridac s PWM
% vystupy - fazova napeti Ua,Ub,Uc
% vstupy - Ura,Urb,Urc - jednotlivá referencni napeti
%          Up - pilove napeti
%          Ud - stejnosmerne napeti meziobvodu

function [Ua,Ub,Uc] = stridac(Ura,Urb,Urc,Up,Ud)

if Ura>=Up;
    Ua0=Ud/2;
else Ua0=(-Ud/2);
end;

if Urb>=Up;
    Ub0=Ud/2;
else Ub0=(-Ud/2);
end;

if Urc>=Up;
    Uc0=Ud/2;
else Uc0=(-Ud/2);
end;

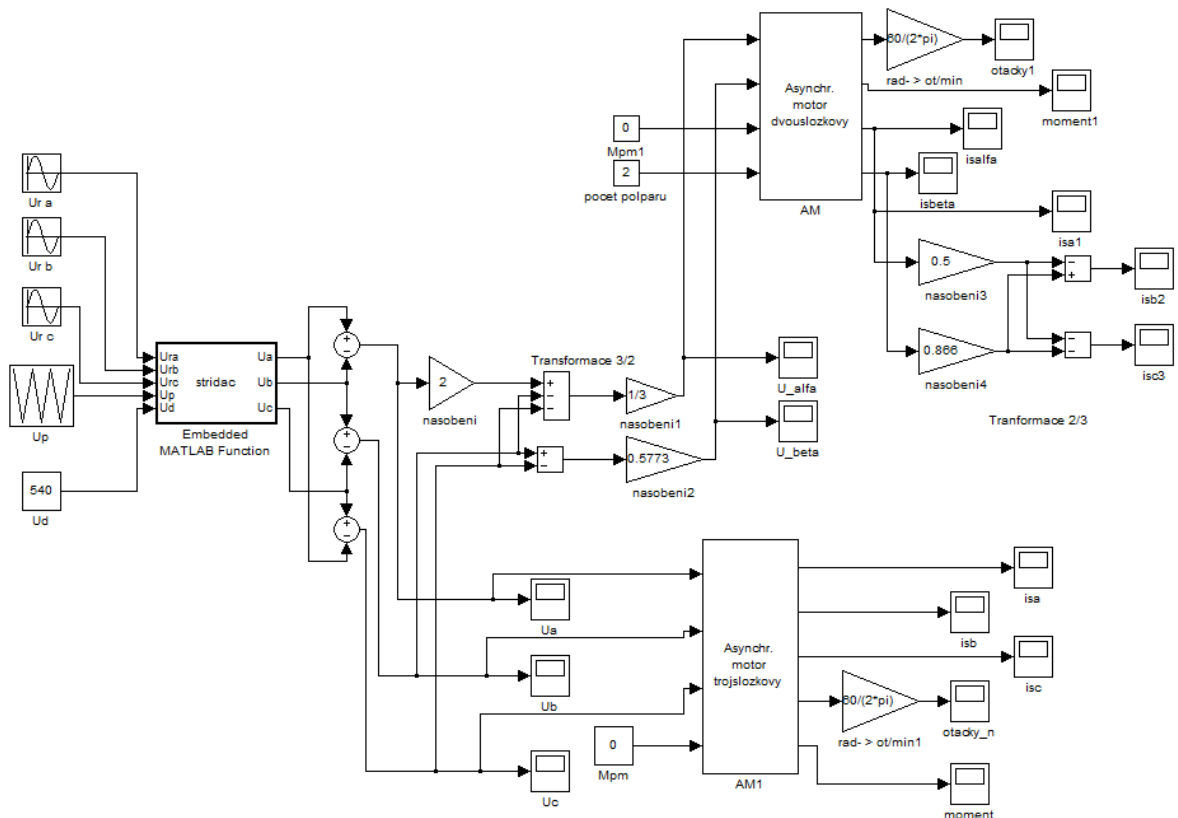
Ua=(2*Ua0-Ub0-Uc0)/3;
Ub=(2*Ub0-Uc0-Ua0)/3;
Uc=(2*Uc0-Ua0-Ub0)/3;

end
```

6 Simulační ověření pohonu

Po dokončení všech potřebných bloků pro simulaci celkového modelu jsem přešel k porovnávání a přesnému měření výsledných hodnot. Simulace se prováděla pro dva typy napájení ze střídače, a to pro pulsní šířkovou modulaci a pro obdélníkové řízení a zobrazoval jsem jednotlivé výstupy u dvojsložkového a trojsložkového asynchronního motoru.

6.1 Výsledky simulace – napájení ze střídače pomocí PWM

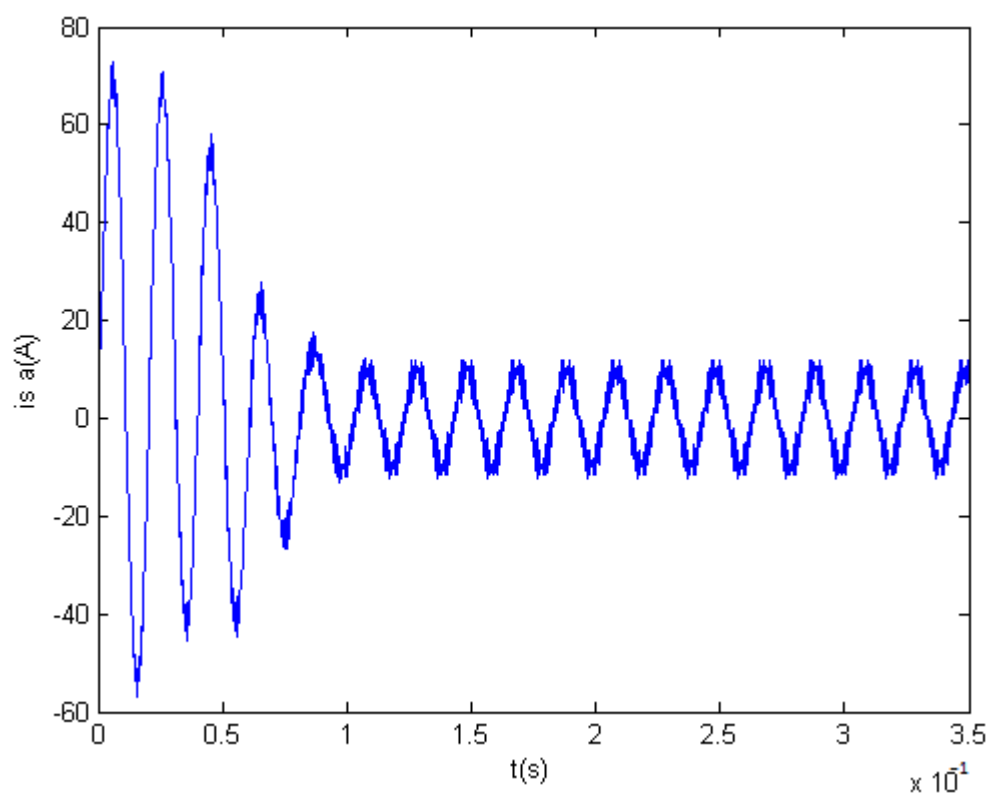


Obrázek 6.1 Výsledné schéma zapojení obou motorů pro napájení ze střídače pomocí PWM

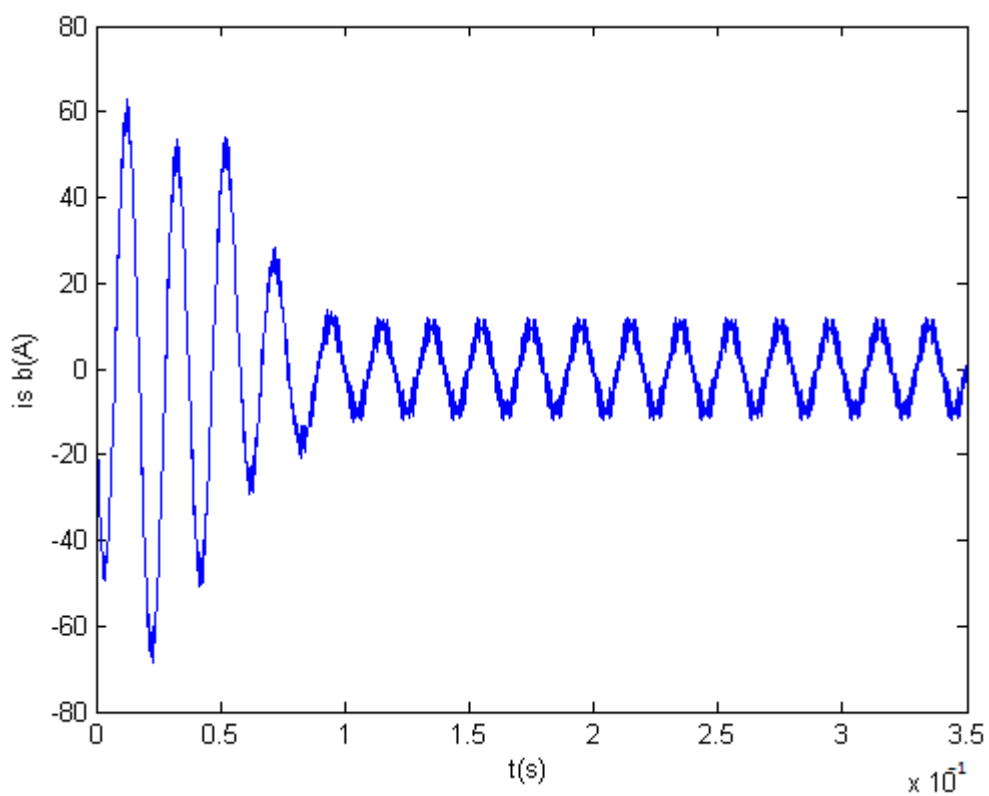
Výstupem ze střídače jsou tudíž fázová napětí U_a , U_b a U_c , ale pro napájení modelů motorů potřebujeme napětí sdružená a tak na výstupu střídače jsou zařazeny rozdílové členy. Pro napájení trojsložkového modelu motoru pak poslouží přímo výsledná sdružená napětí U_{ab} , U_{bc} a U_{ca} , ale pro napájení dvojsložkového modelu motoru je nutné provést transformaci 3 na 2, abychom dostali napětí U_{sa} a U_{sb} . Transformace 3/2 je popsána v bodě.

Pro zobrazení otáček je pak ve schématu blok násobení s konstantou $60/(2\pi)$, který umožňuje přepočítání z rad/s na ot/min.

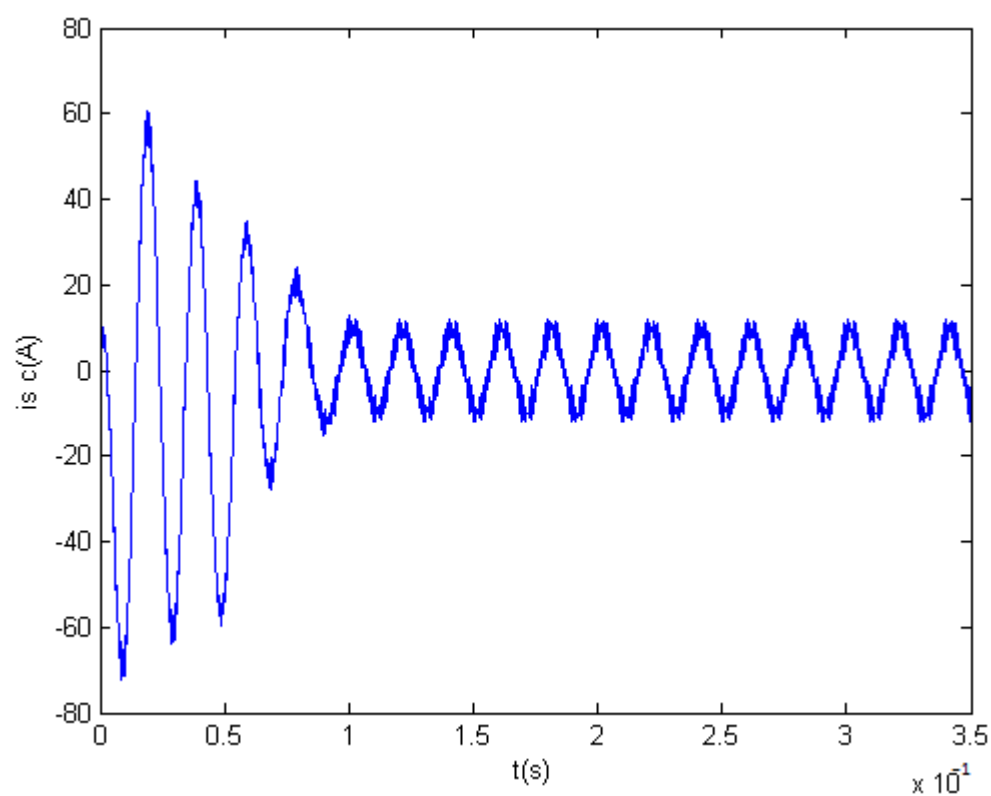
6.1.1 Výsledky simulace pro dvojsložkový AM– napájení pomocí PWM



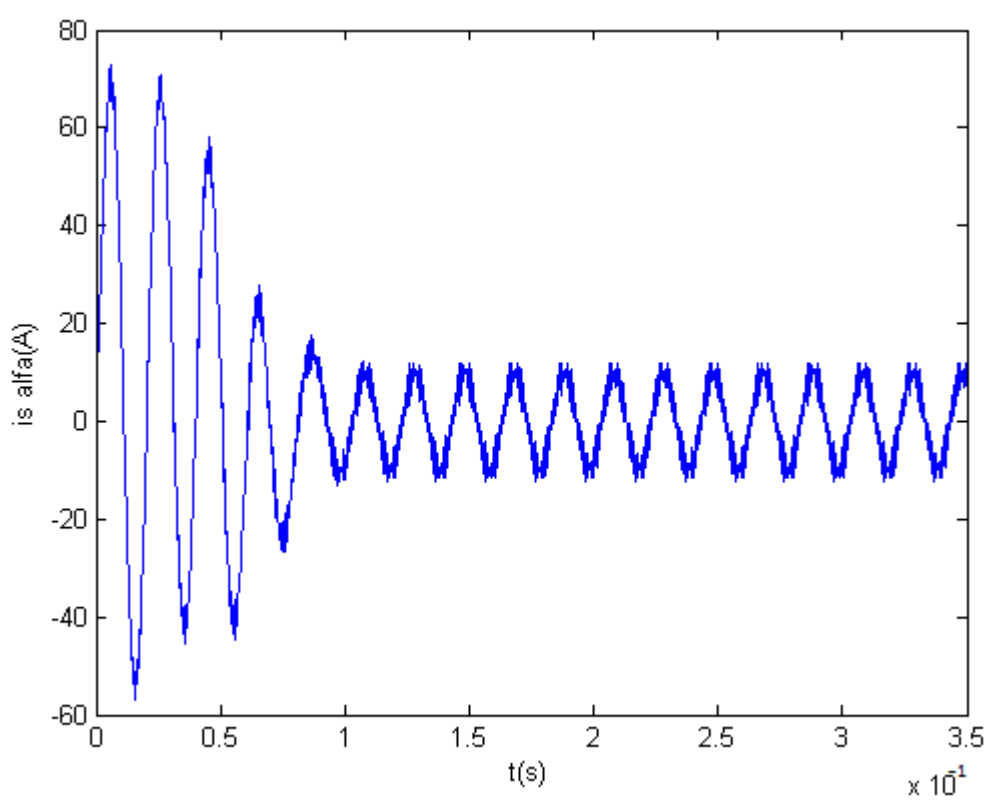
Obrázek 6.2 Průběh statorového proudu i_{sa}



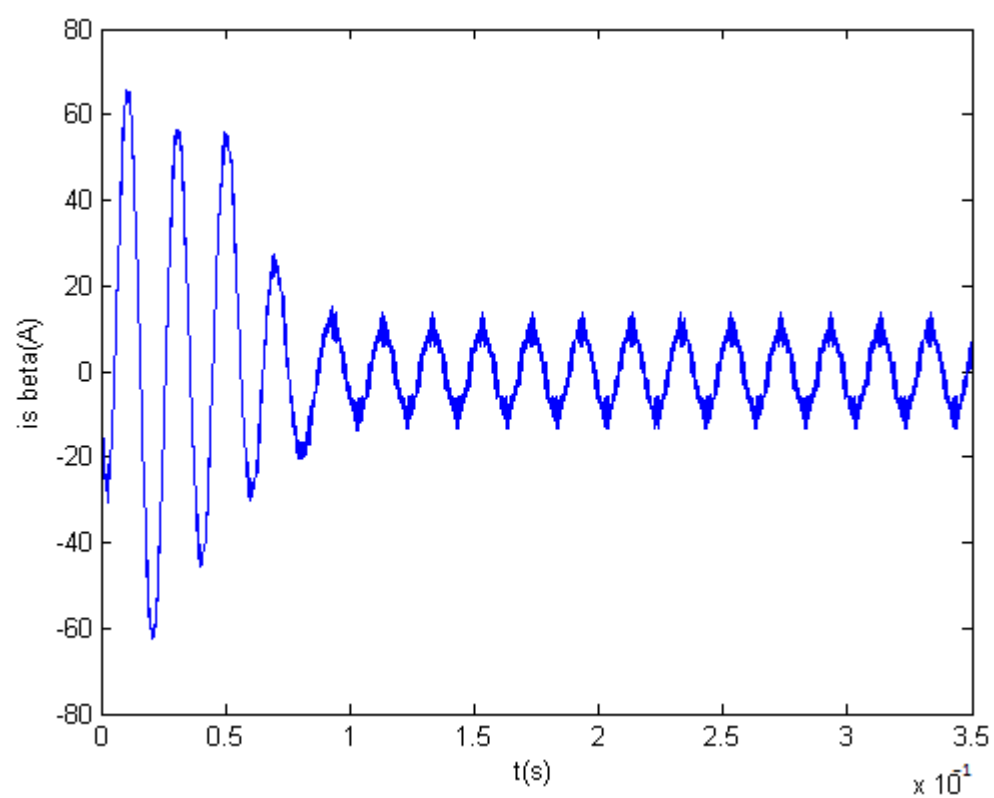
Obrázek 6.3 Průběh statorového proudu i_{sb}



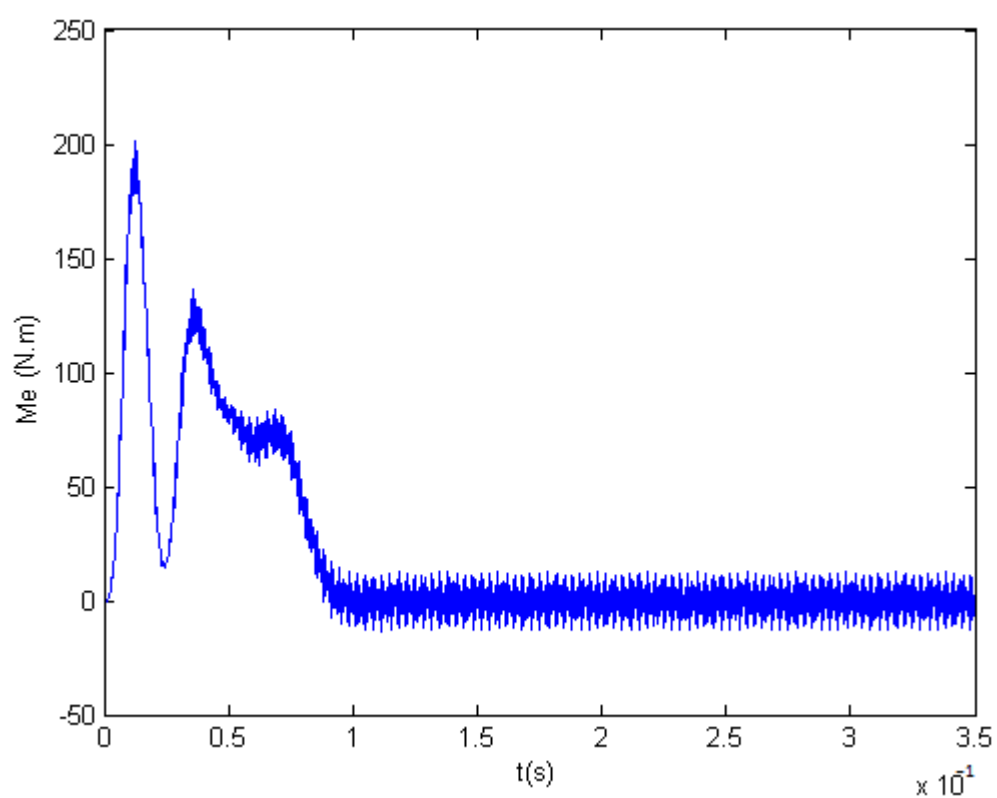
Obrázek 6.4 Průběh statorového proudu i_{sc}



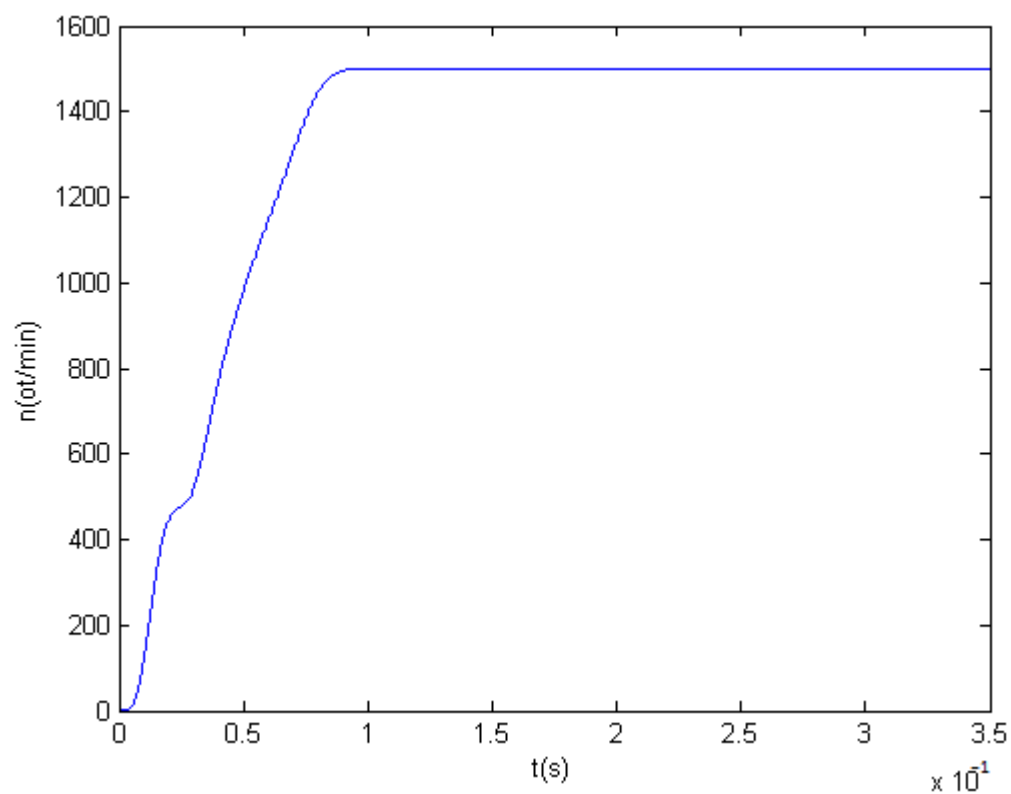
Obrázek 6.5 Průběh proudu i_{sa}



Obrázek 6.6 Průběh proudu i_{β}

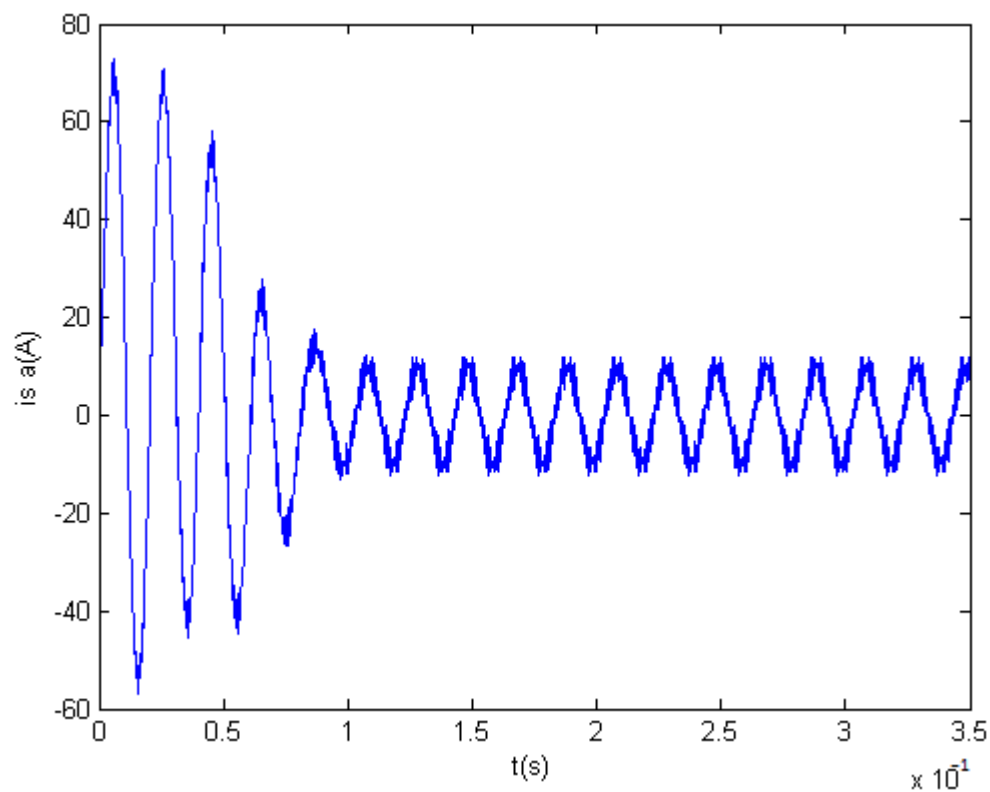


Obrázek 6.7 Průběh elektromagnetického momentu motoru M_e

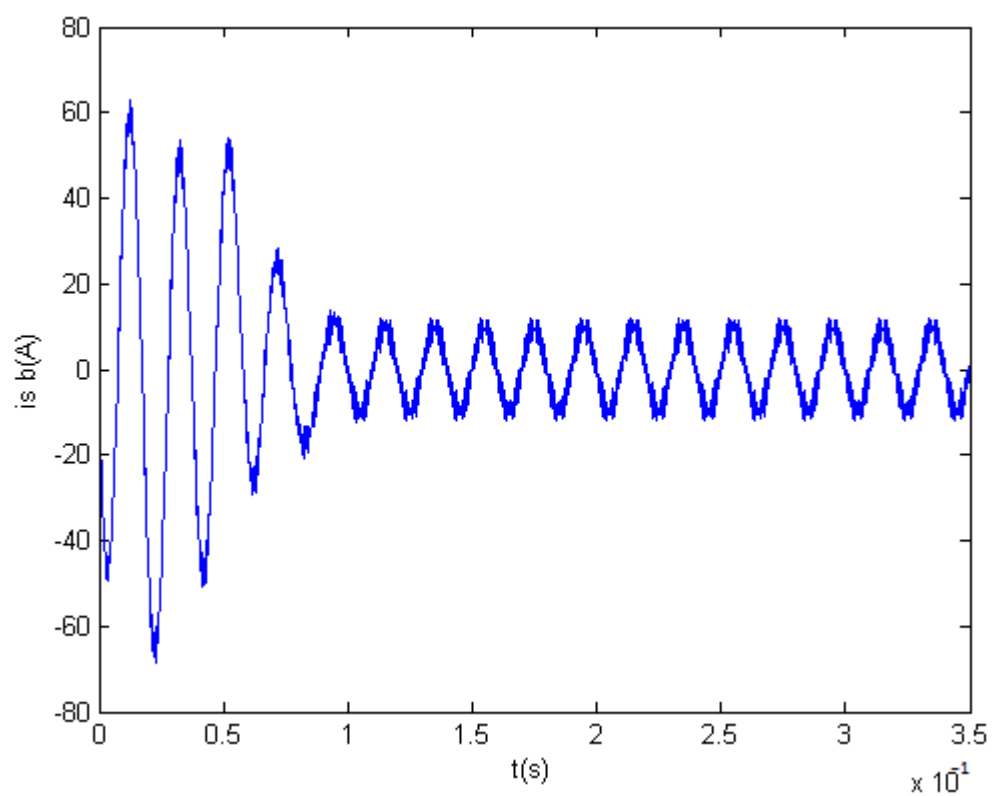


Obrázek 6.8 Průběh otáček motoru

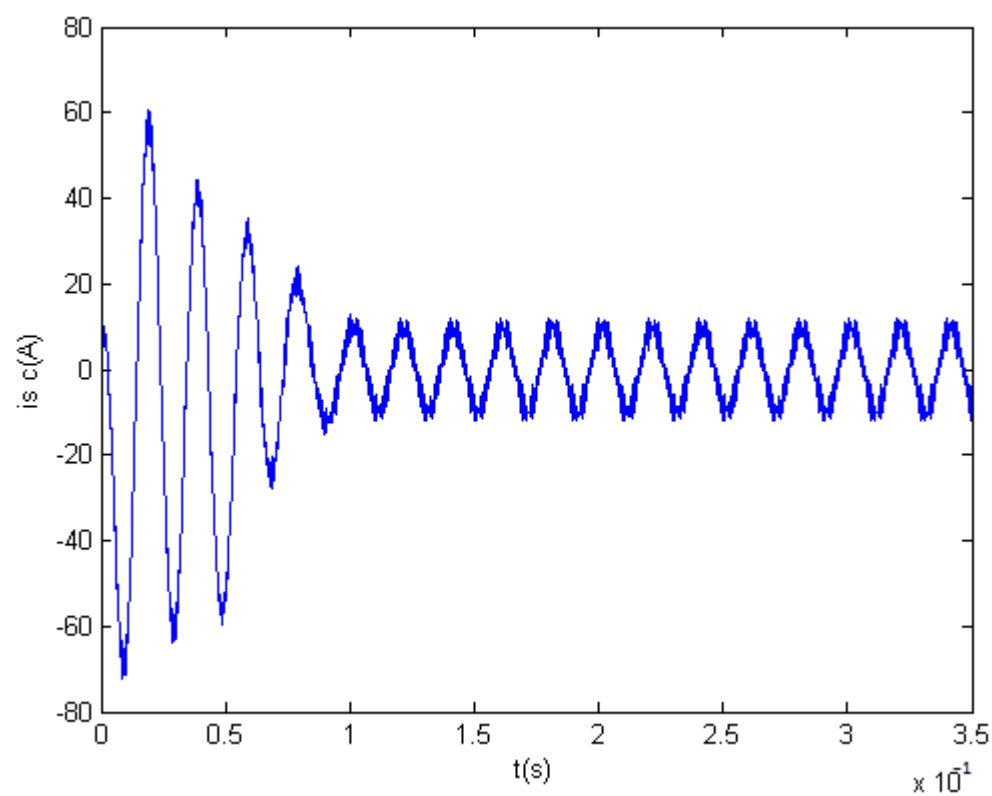
6.1.2 Výsledky simulace pro trojsložkový AM – napájení pomocí PWM



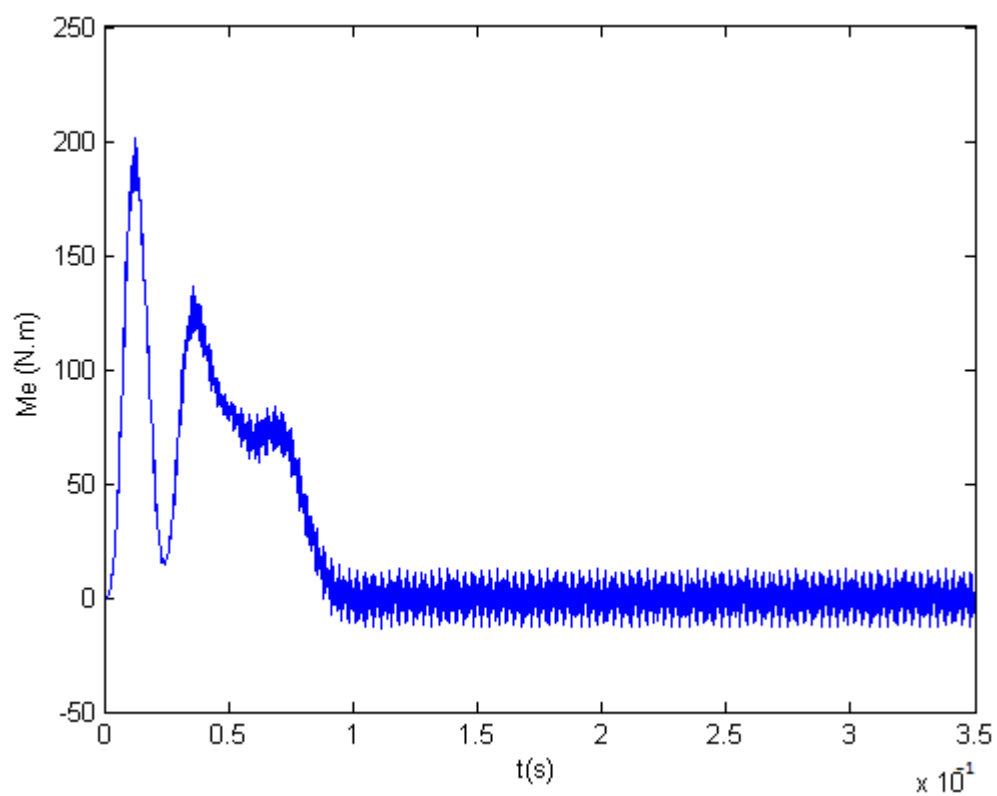
Obrázek 6.9 Průběh statorového proudu i_{sa}



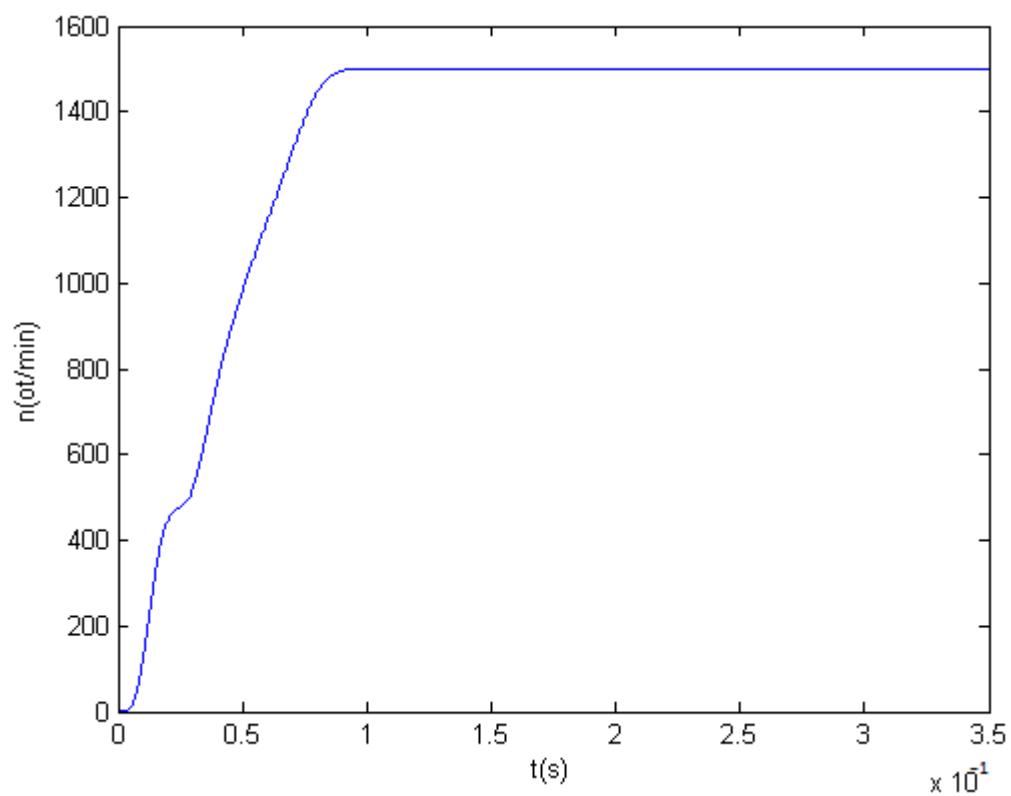
Obrázek 6.10 Průběh statorového proudu i_{sb}



Obrázek 6.11 Průběh statorového proudu i_{sc}



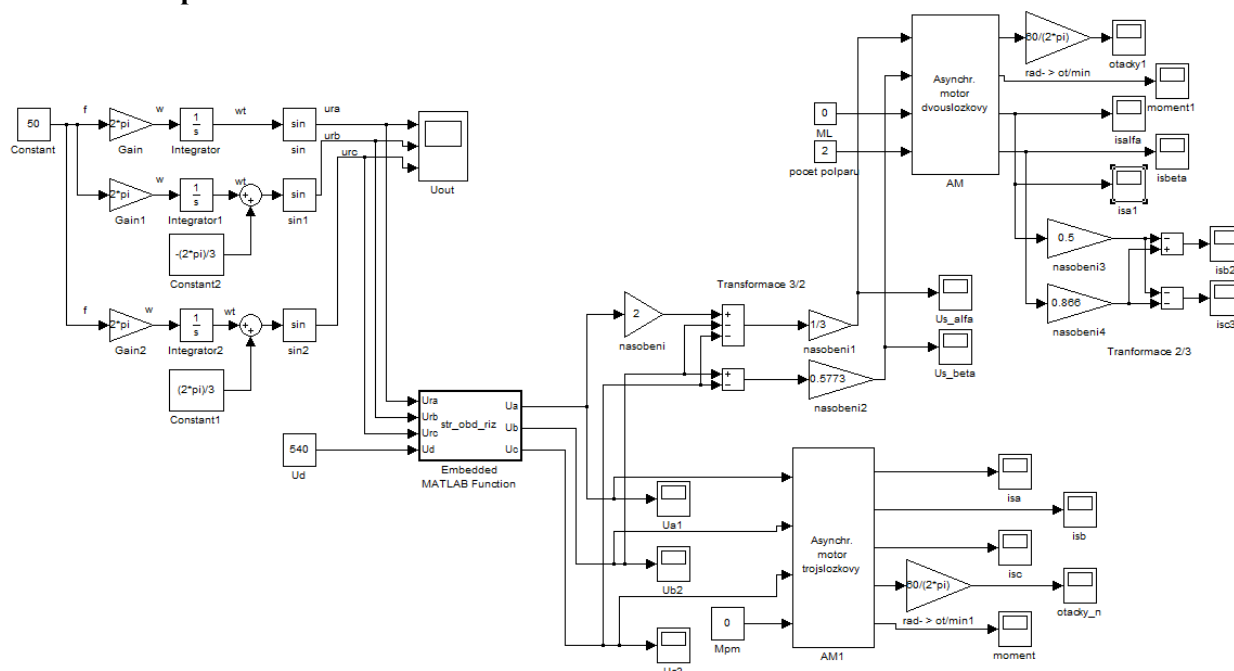
Obrázek 6.12 Průběh elektromagnetického momentu motoru M_e



Obrázek 6.13 Průběh otáček motoru

6.2 Výsledky simulace – napájení ze střídače s obdélníkovým řízením

Blok pro nasimulování funkce střídače s obdélníkovým řízením je detailně popsán výše, konkrétně v kapitole 5.1.



Obrázek 6.14 Výsledné schéma zapojení obou motorů pro napájení ze střídače s obdélníkovým řízením

Do vytvořeného bloku střídače vstupují tři řídicí napětí u_{ra} , u_{rb} , u_{rc} , která ale nejsou tvořena přímo pomocí jednoho bloku pro sinusový průběh z knihovny, ale sinusovky jsou vytvořeny podle rovnice v obecném tvaru

$$a = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (6.2 - 1)$$

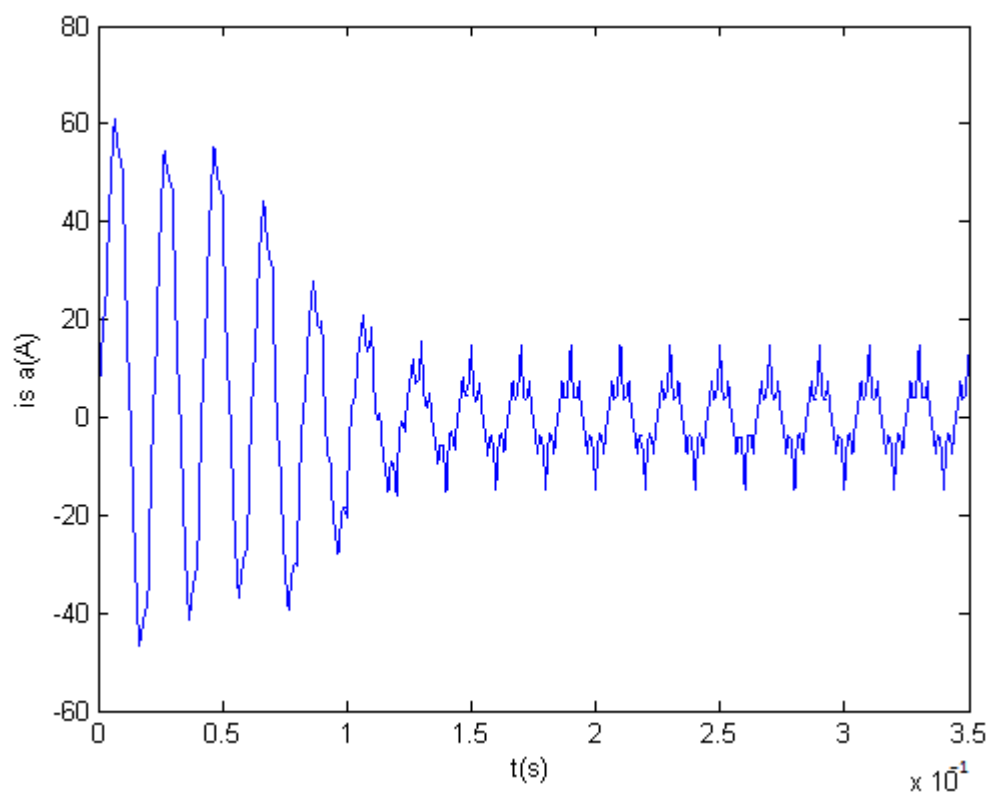
Frekvence f těchto napětí je nastavena na 50 Hz a jednotlivé signály jsou mezi sebou vzájemně posunuty o 120° . Další vstup do tohoto bloku je blok U_d , který udržuje konstantní hodnotu a představuje tak napětí v meziobvodu.

Jako výstup z tohoto bloku vycházejí tři fázová napětí U_a , U_b a U_c .

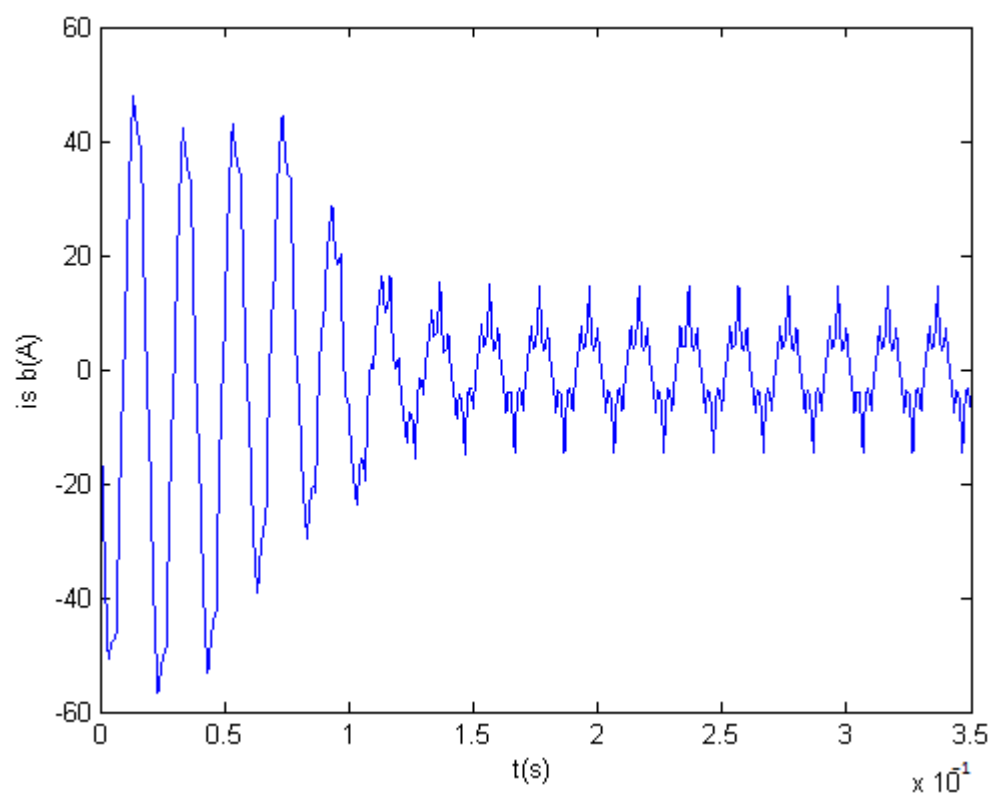
Těmito napětími je pak napájen přímo blok trojsložkového asynchronního motoru. Pro napájení dvousložkového asynchronního motoru se i zde musela udělat transformace 3 na 2, abychom dostali napájecí napětí pro blok ve tvaru U_{sa} a U_{sb} . I tady se musela použít zpětná transformace pro získání jednotlivých statorových proudů proudy i_{sa} , i_{sb} a i_{sc} z dvojsložkového modelu. Transformace je popsána v kapitole 3.2 a to rovnicemi 3.2-1 až 11.

I v tomto případě simulace jsem pak použil na výstupu před osciloskop blok s konstantou $60/(2\pi)$, který zajišťuje přepočítání z rad/s na ot/min.

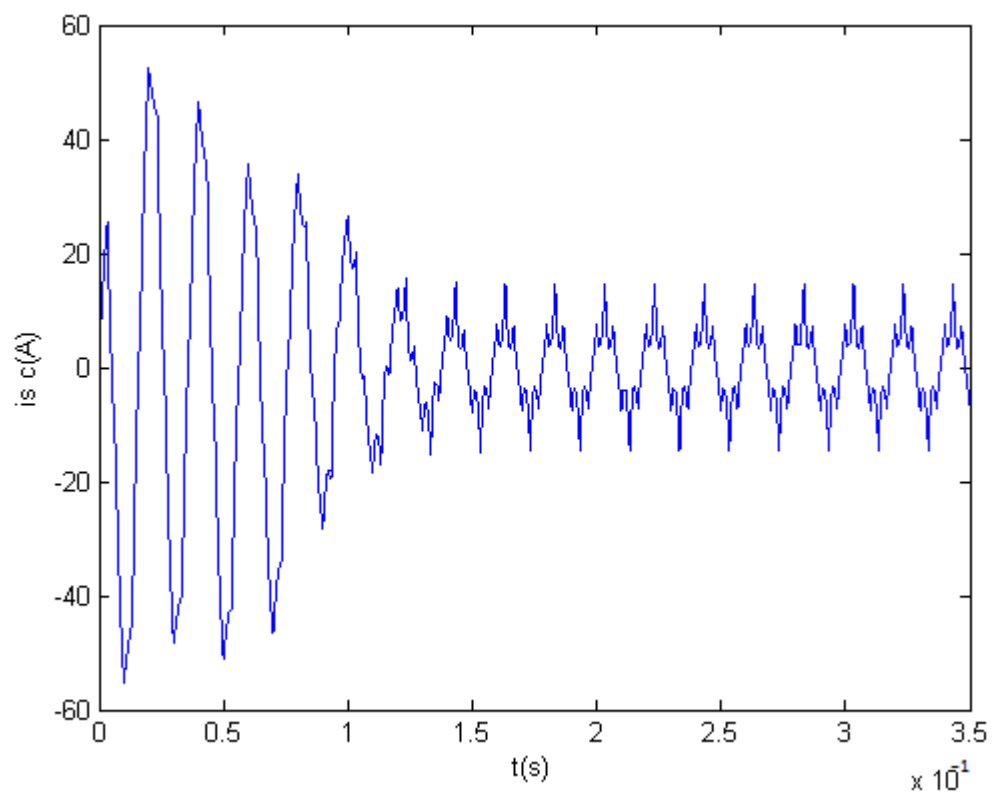
6.2.1 Výsledky simulace pro dvojsložkový AM – střídač s obdélníkovým řízením



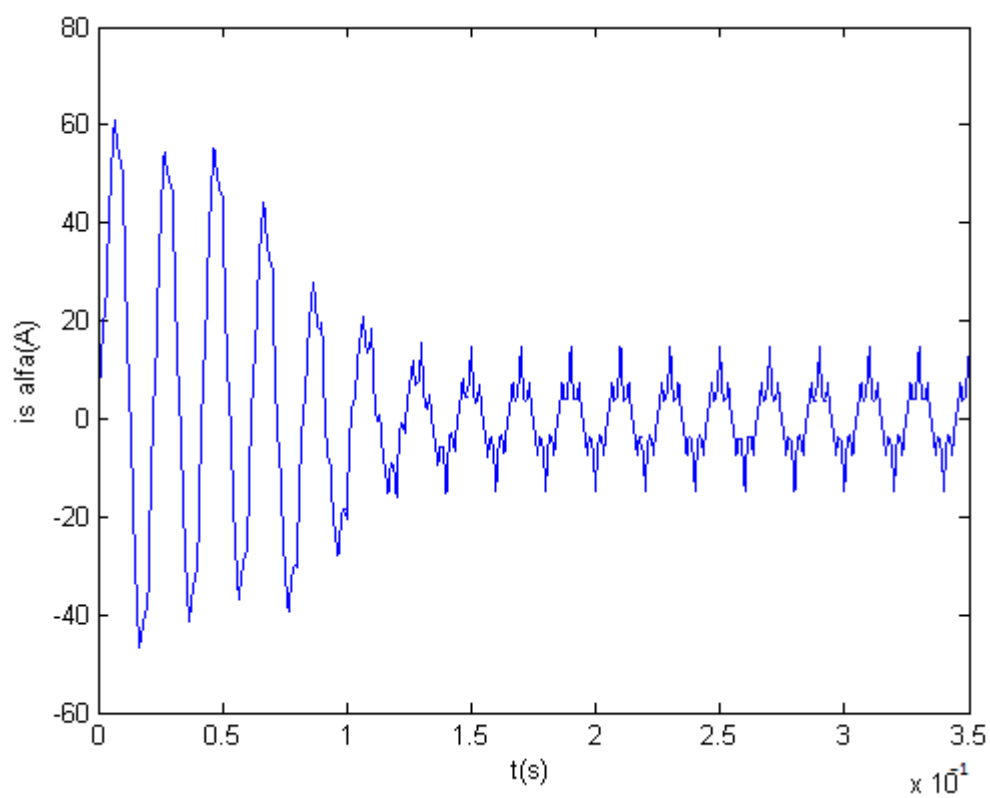
Obrázek 6.15 Průběh statorového proudu i_{sa}



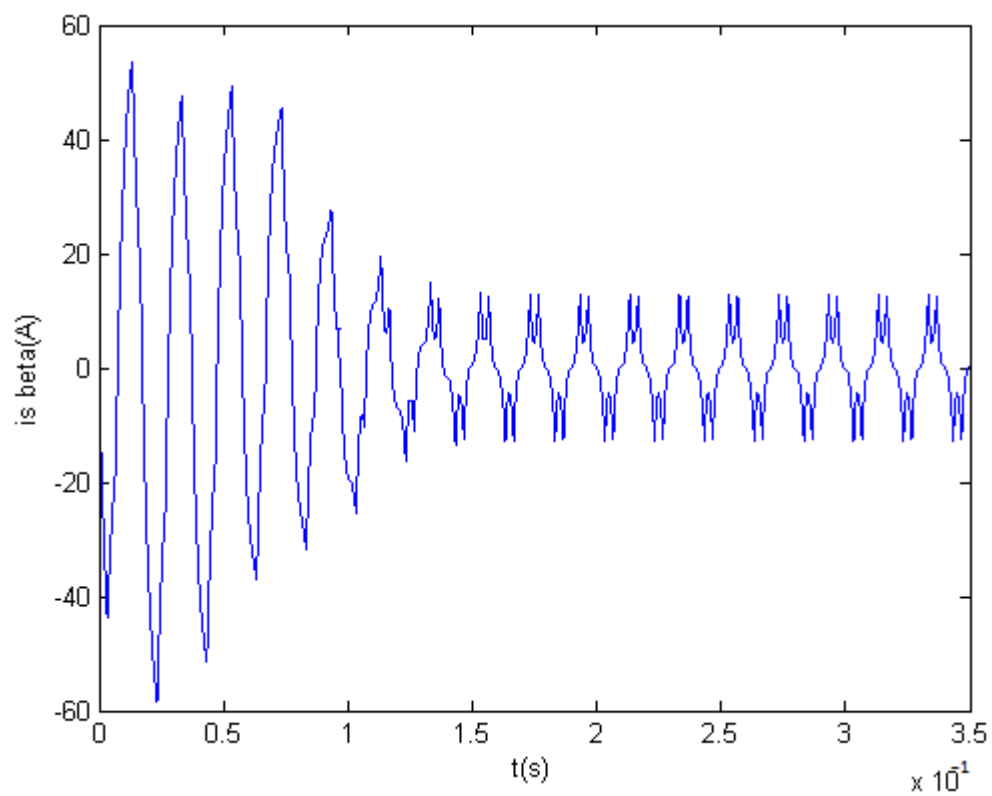
Obrázek 6.16 Průběh statorového proudu i_{sb}



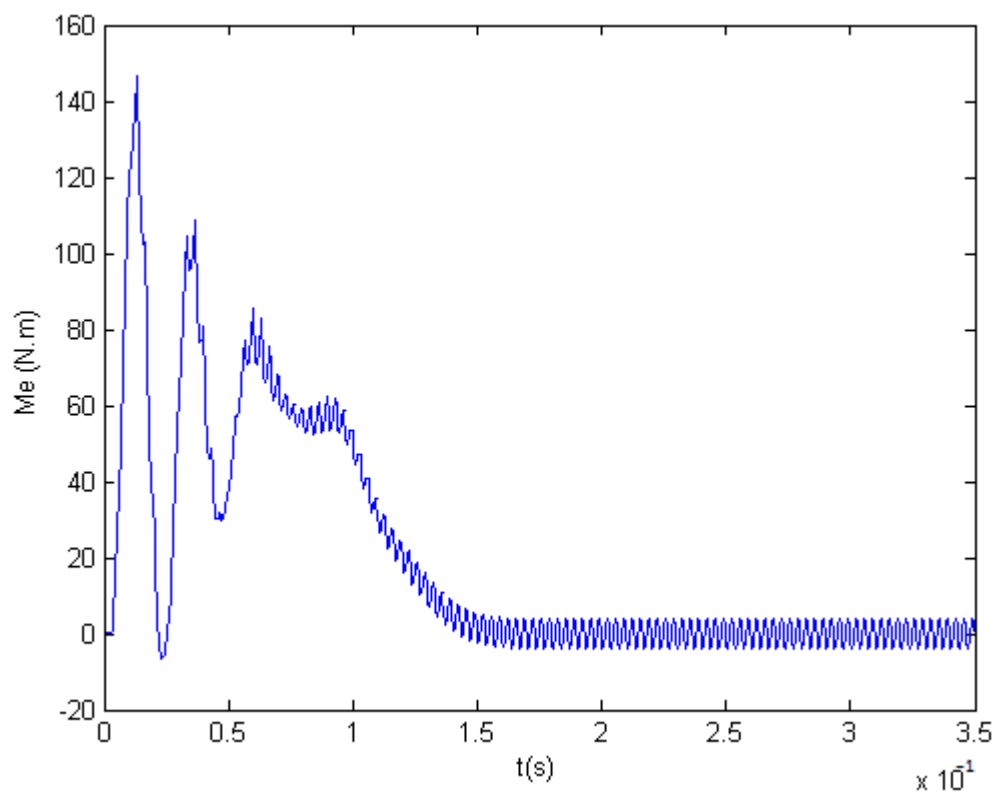
Obrázek 6.17 Průběh statorového proudu i_{sc}



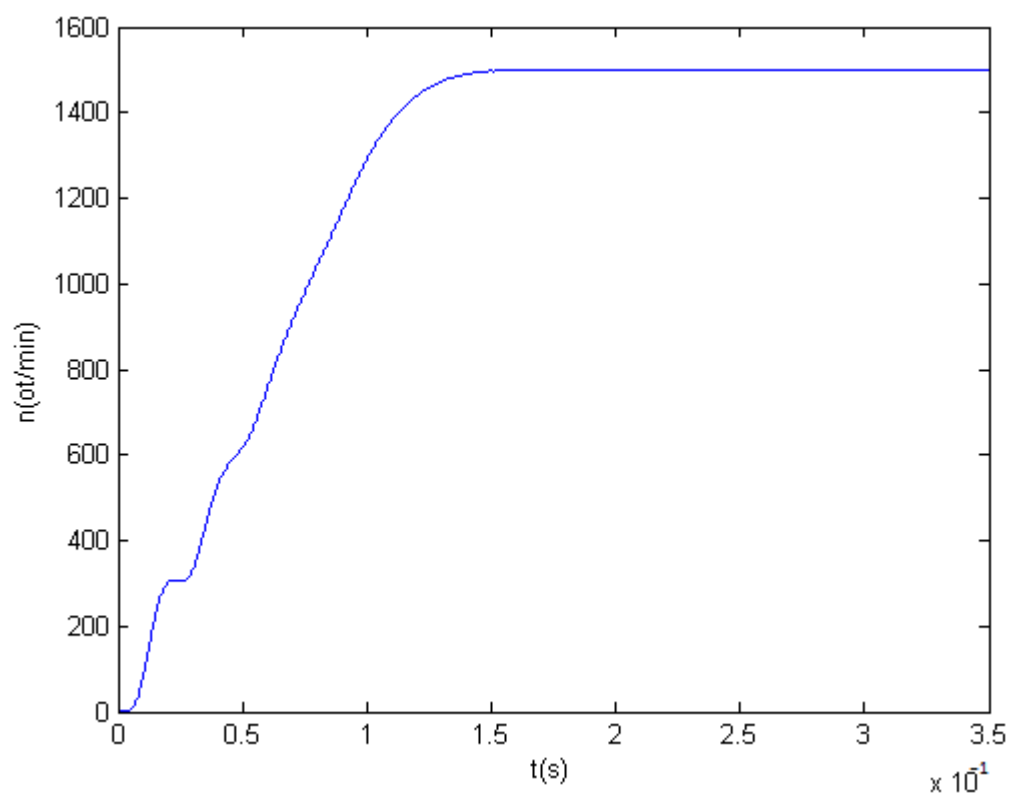
Obrázek 6.18 Průběh statorového proudu i_{sa}



Obrázek 6.19 Průběh statorového proudu i_{β}

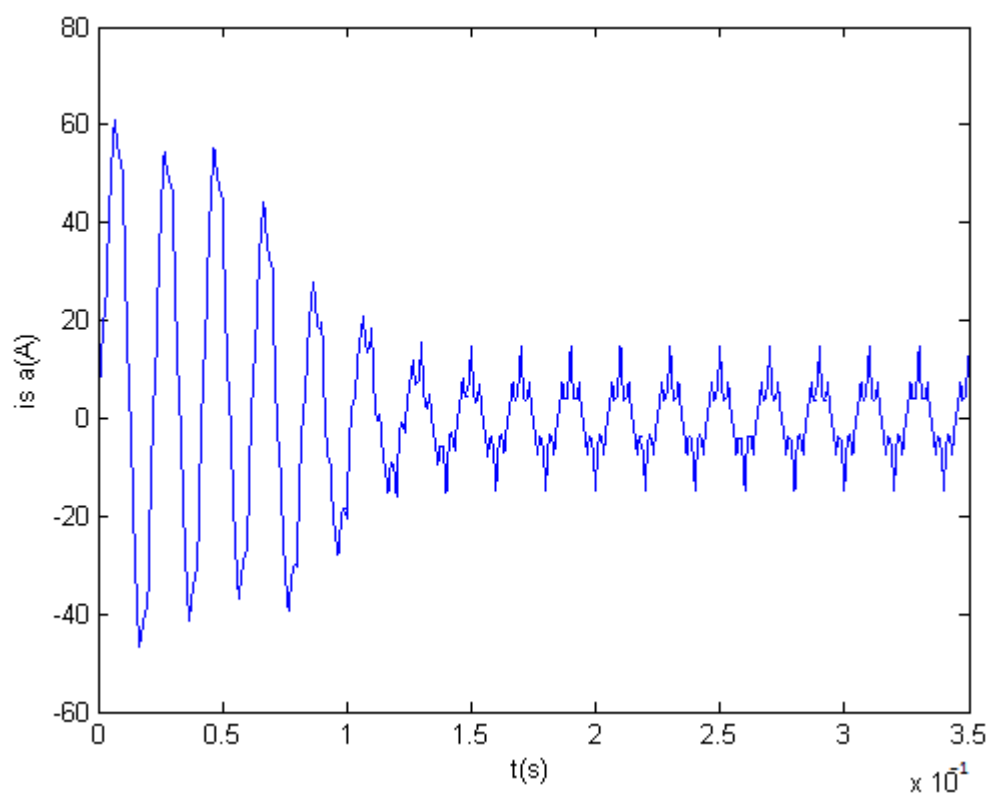


Obrázek 6.20 Průběh momentu motoru M_e

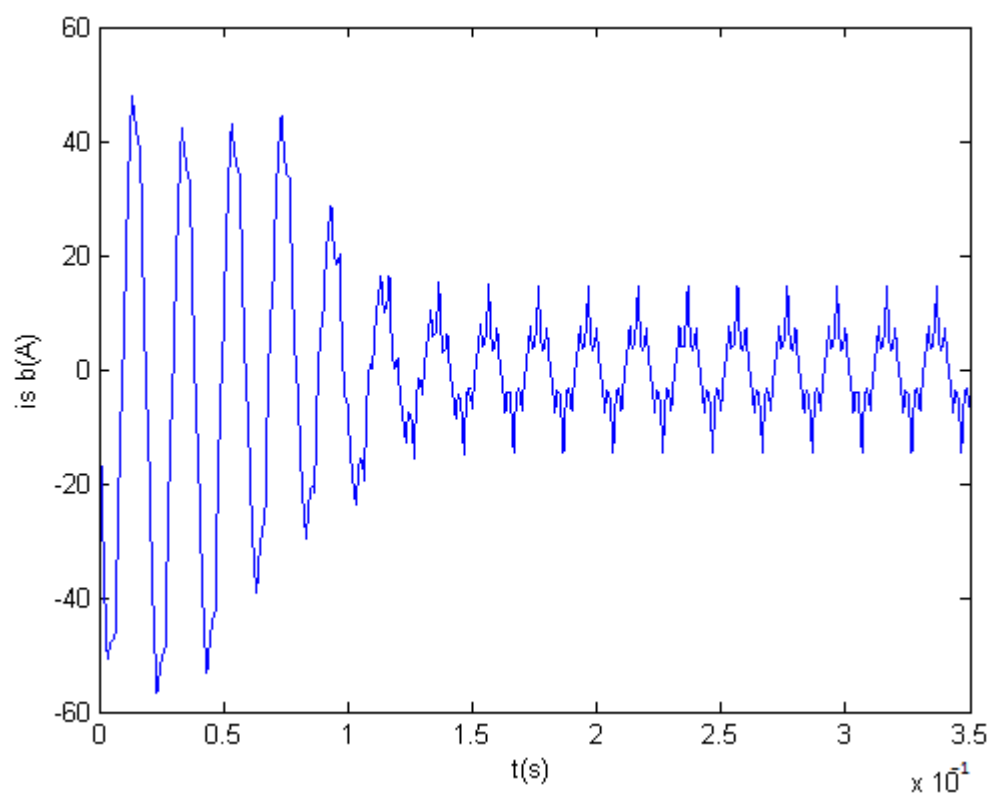


Obrázek 6.21 Průběh otáček motoru

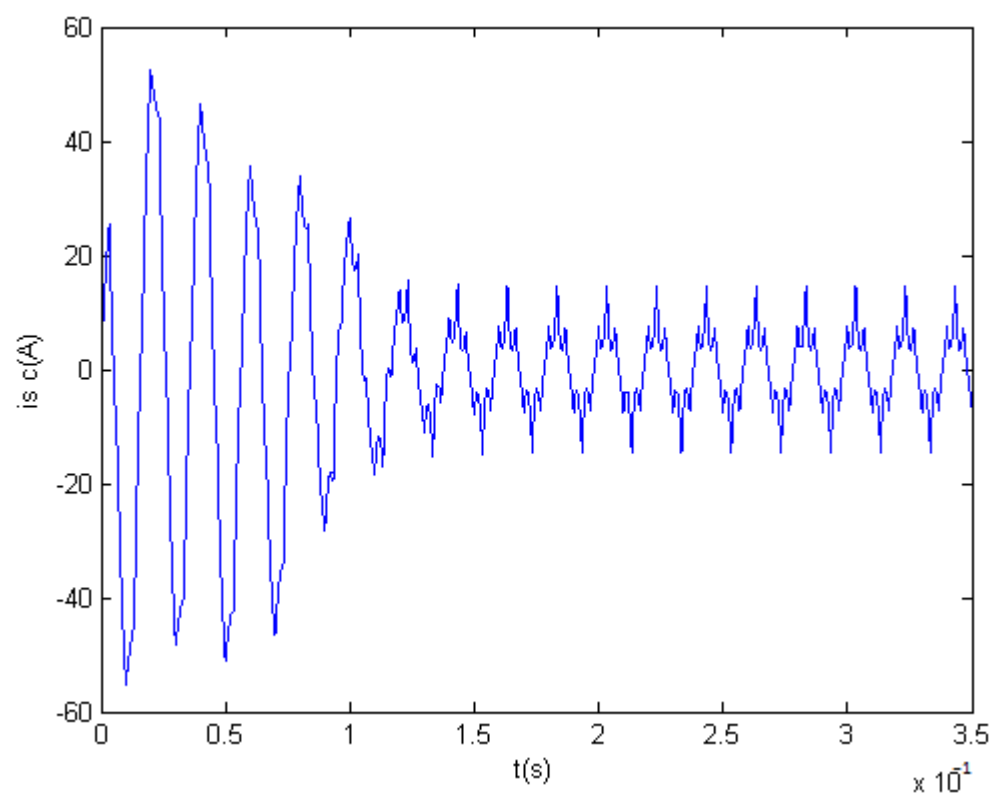
6.2.2 Výsledky simulace pro trojsložkový AM – střídač s obdélníkovým řízením



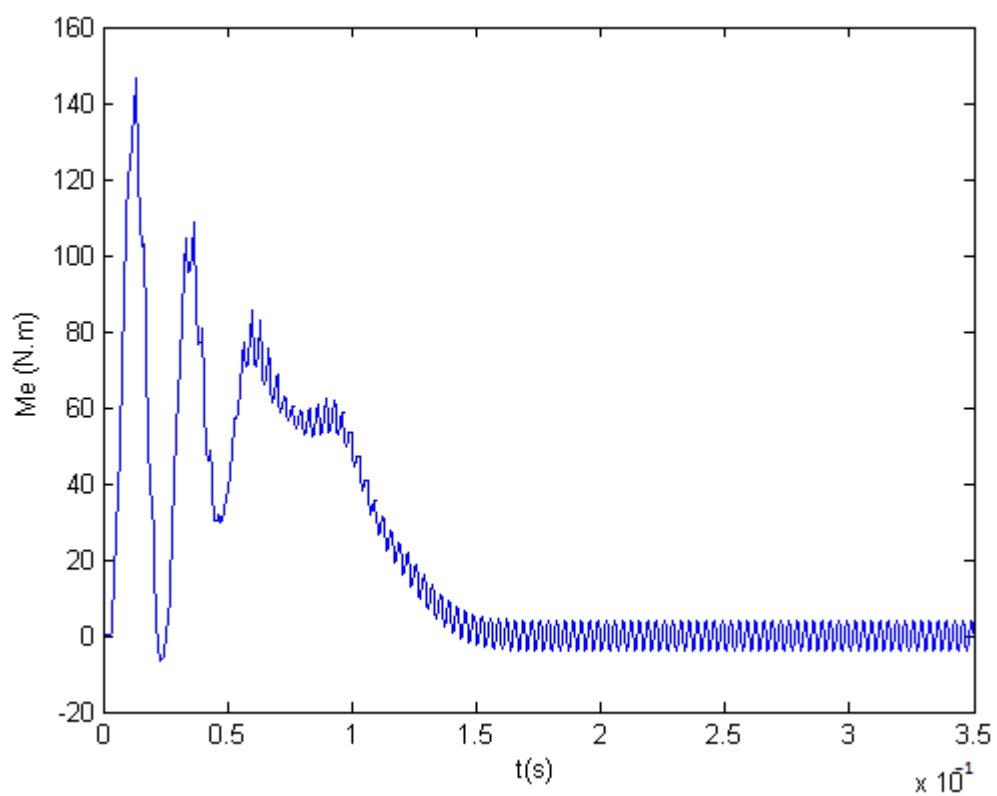
Obrázek 6.22 Průběh statorového proudu i_{sa}



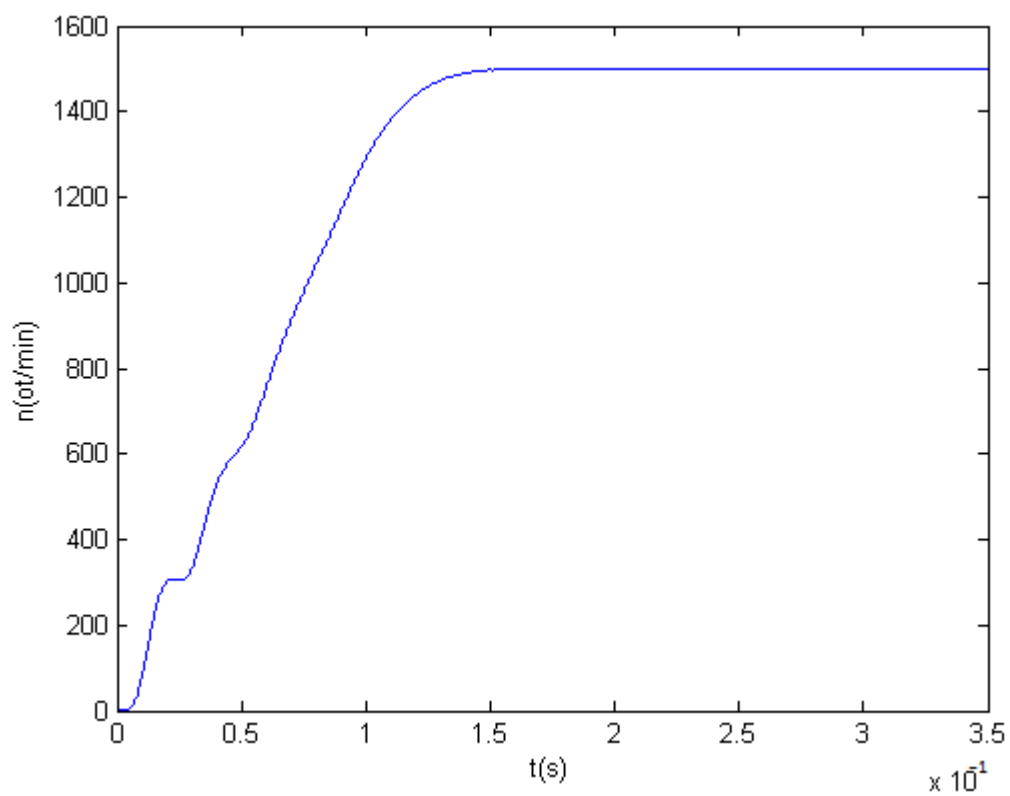
Obrázek 6.23 Průběh statorového proudu i_{sb}



Obrázek 6.24 Průběh statorového proudu i_{sc}



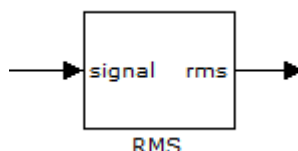
Obrázek 6.25 Průběh elektromagnetického momentu M_e motoru



Obrázek 6.26 Průběh otáček motoru

6.3 Měření přesných hodnot v simulaci

Z předchozích naměřených průběhů lze pouhým okem zjistit, že u dvousložkového a trojsložkového modelu asynchronního motoru jsou průběhy při stejném druhu napájení totožné. Pro toto tvrzení potřebujeme i číselné ověření a tak jsem do schématu zařadil i blok měření efektivních hodnot, aby bylo možné přímo porovnat jednotlivé výstupy.



Obrázek 6.27 Blok pro měření efektivních hodnot

Následně jsem změřil přesné efektivní hodnoty jednotlivých statorových proudů i_{sa} , i_{sb} a i_{sc} pro dvousložkový a trojsložkový model při různém napájení. Tyto hodnoty jsem pak vynesl do tabulky.

	Napájení ze střídače s PWM		Napájení ze střídače s obd. řízením	
	Dvousložkový	Trojsložkový	Dvousložkový	Trojsložkový
i_{sa} (A)	7,0831	7,0842	6,0919	6,0971
i_{sb} (A)	7,0795	7,0722	6,0901	6,0906
i_{sc} (A)	7,0554	7,0598	6,0965	6,0973

Tabulka 6.3 Naměřené efektivní hodnoty statorových proudů

Z tabulky je patrné, že se potvrzuje vizuální zjištění, že se průběhy od sebe skoro neliší. Samozřejmě by hodnoty u obou modelů měly být naprosto stejné a totožné, ale zvolil jsem záměrně velikost efektivních hodnot až na čtyři místa za desetinnou čárkou, abych poukázal na to, kdy až se proudy od sebe liší. Rozdíly jsou tak až v řádech miliampér a jelikož se pohybujeme v jednotkách ampér, jsou zanedbatelné a můžeme tak říci, že průběhy se shodují.

Pro ještě větší přesnost měření jsem si do obvodu zapojil rozdílový člen a přivedl na něj dva proudy stejné fáze, z každého modelu jednu fázi při jednom stejném napájení. V ideálním případě by byl výstup z rozdílového členu nulový, což by značilo, že průběhy jsou totožné. Jak už jsem ale zmínil výše, podle naměřených hodnot můžeme zjistit nepatrnou odchylku a tu mi potvrdil i tento rozdílový člen. Výsledné rozdílné hodnoty porovnávaných signálů byly ale v řádech miliampér, což jsou už tak malé hodnoty, že tyto rozdílnosti můžeme připisovat chybě simulace.

6.4 Detailnější průběhy simulace

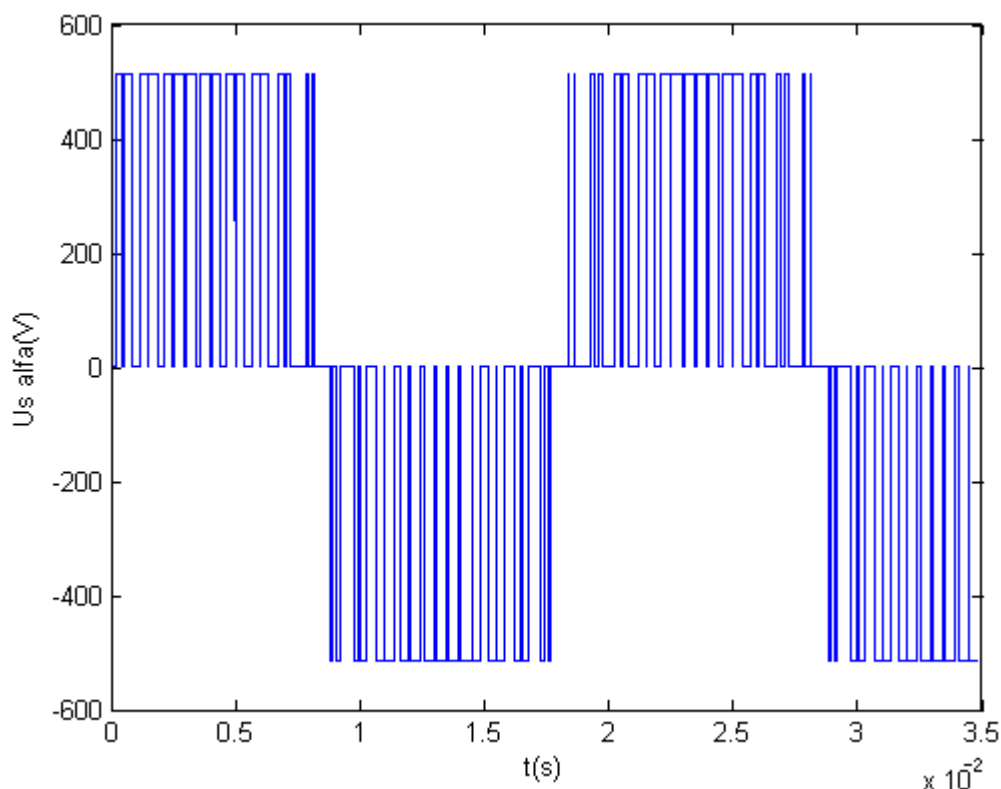
Jelikož se v obvodu vyskytují i osciloskopy pro zobrazení vstupního napětí ze střídače, uvedu zde i tyto průběhy, aby bylo vidět, jak se liší tvar napájecího napětí ze střídače při jednotlivých metodách napájení. Aby dobře vynikl tvar a velikost jednotlivých průběhů zmenšil jsem časovou osu a dosáhl tak většího detailu průběhů.

Uvedu zde průběhy napětí pro napájení dvojsložkového modelu, a to jsou napětí U_{sa} a U_{sb} , jelikož se tato napětí od sebe liší tvarem.

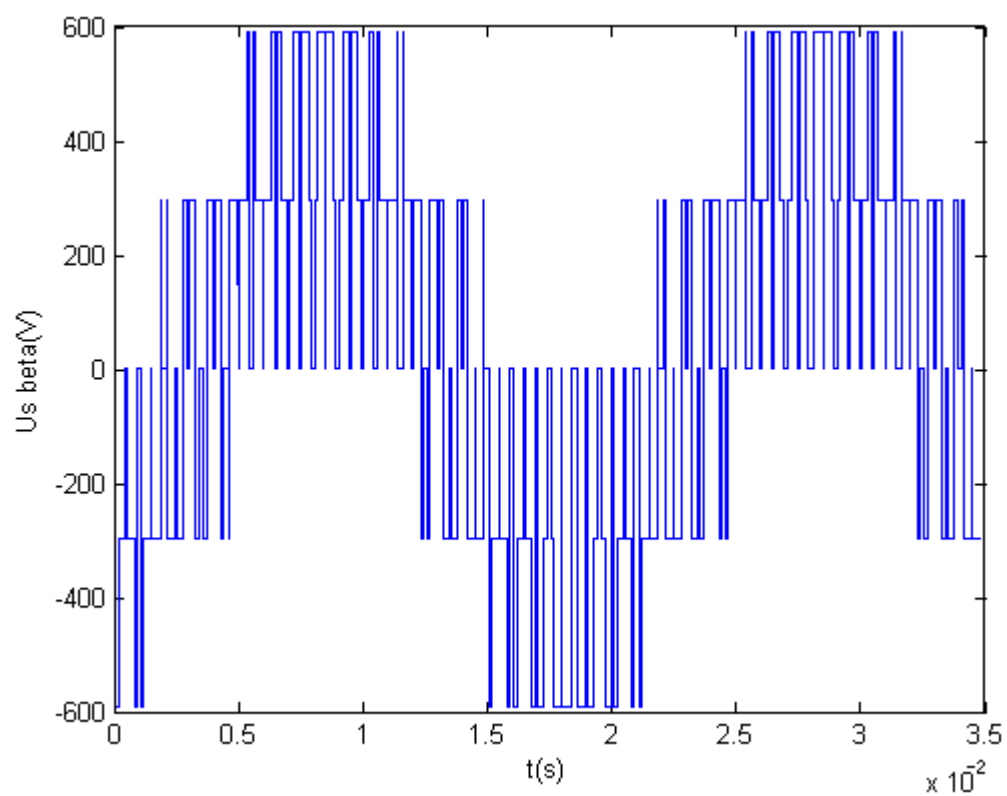
U trojsložkového modelu mají všechna napětí stejný tvar a liší se pouze fázovým posunutím jednotlivých signálů od sebe. Proto jsem vybral pro názornost napětí U_b , aby bylo šlo vidět, že toto napětí je jiné než U_{sa} , protože při Parkově transformaci platí $U_{sa} = U_a$.

Jako poslední průběh je pak v každé podkapitole detail tvaru proudu při konkrétním řízení, aby bylo vidět, jak se jednotlivé výstupní proudy od sebe liší tvarem, při jiném druhu napájení ze střídače.

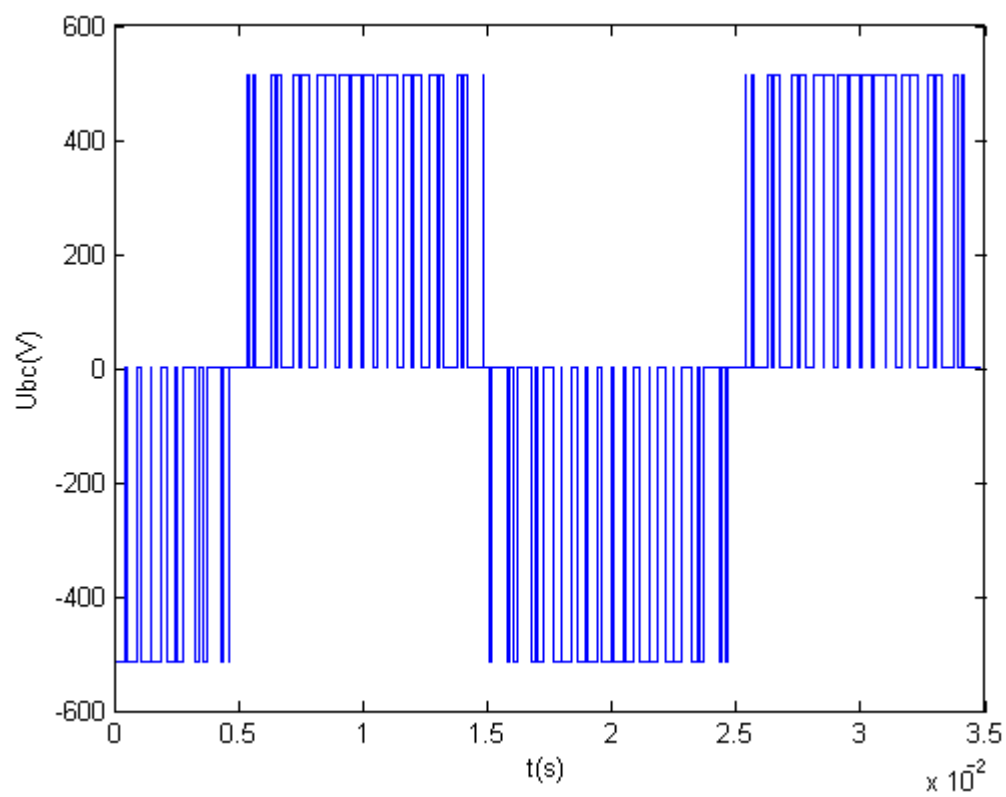
6.4.1 Detaily průběhů při napájení ze střídače s PWM



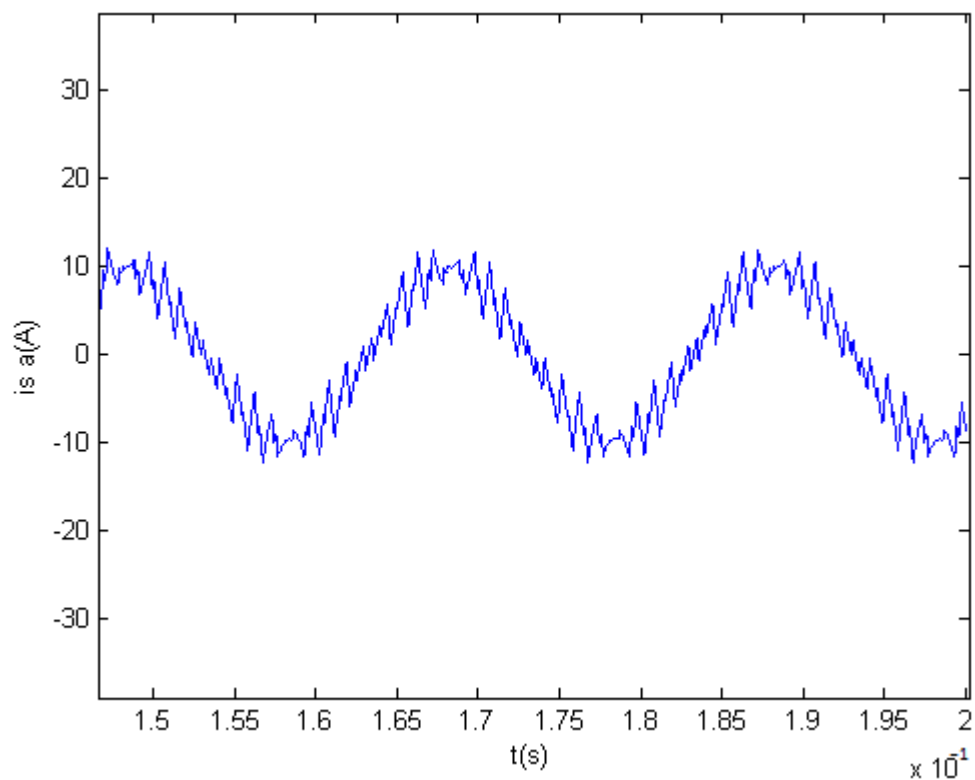
Obrázek 6.28 Průběh statorového napětí U_{sa}



Obrázek 6.29 Průběh statorového napětí U_{β}

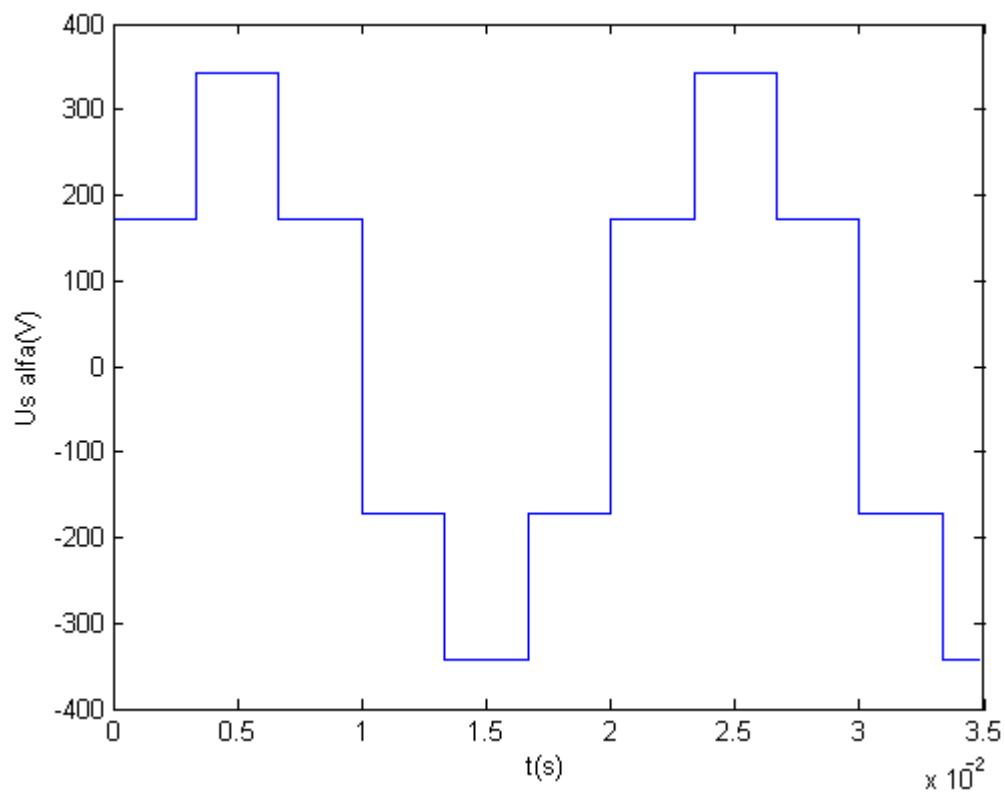


Obrázek 6.30 Průběh sdruženého napětí U_{bc}

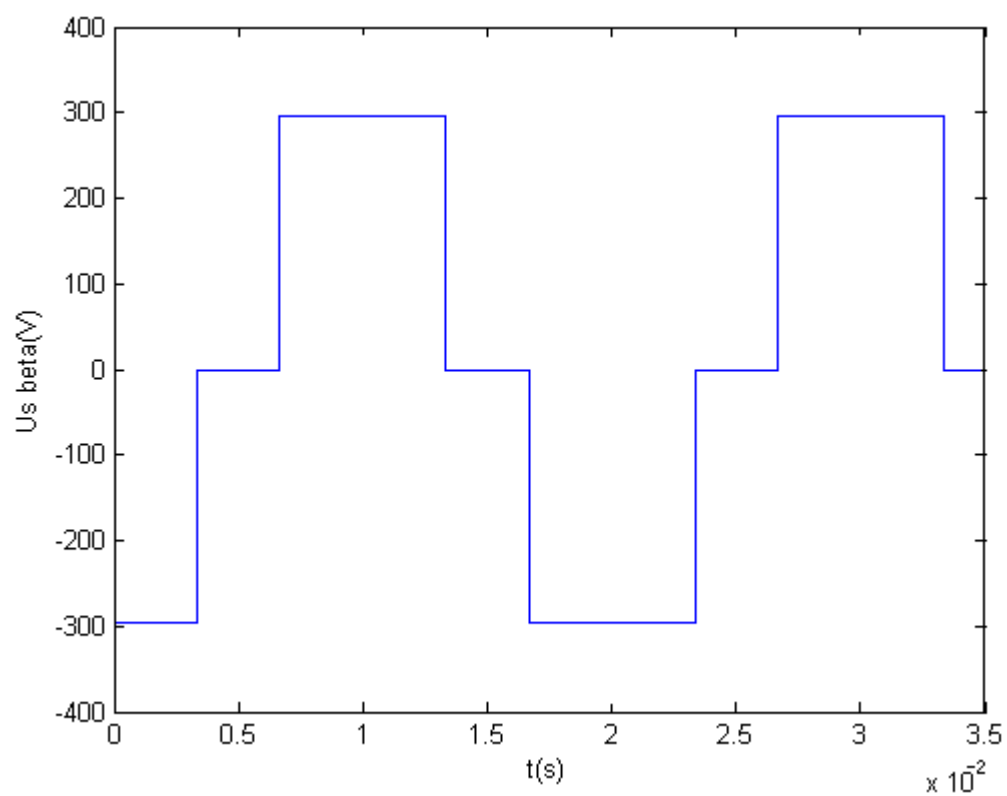


Obrázek 6.31 Detail tvaru výstupního statorového proudu i_{sa} při pulsní šířkové modulaci

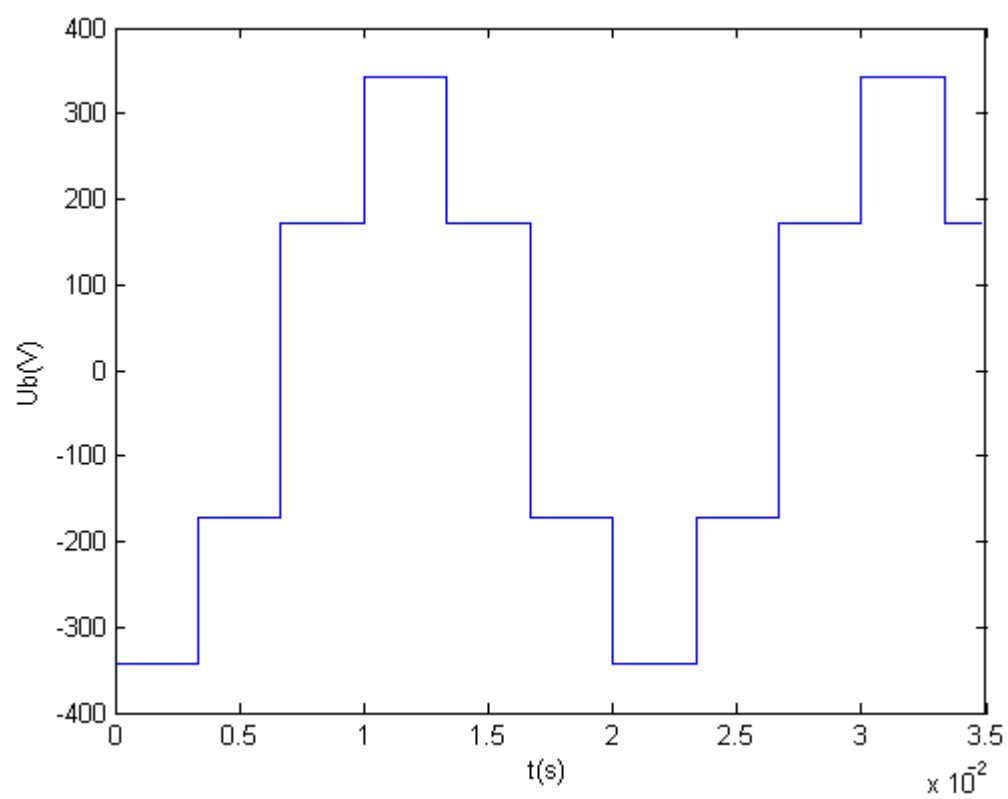
6.4.2 Detaily průběhů při napájení ze střídače s obdélníkovým řízením



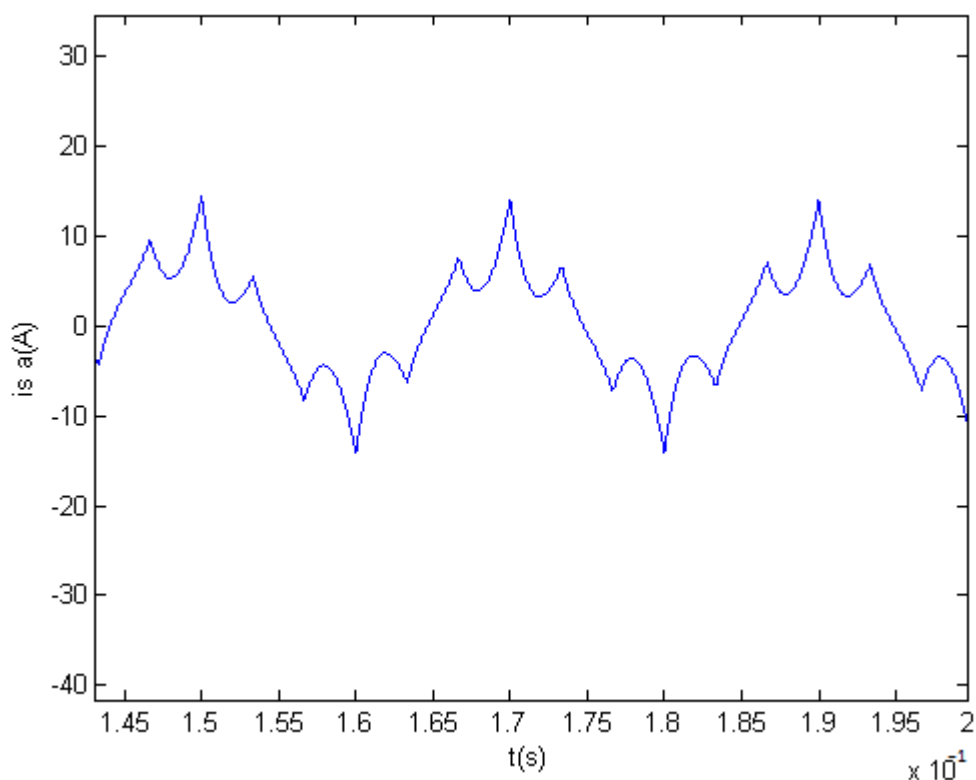
Obrázek 6.32 Průběh statorového napětí U_{sa}



Obrázek 6.33 Průběh statorového napětí $U_{s\beta}$



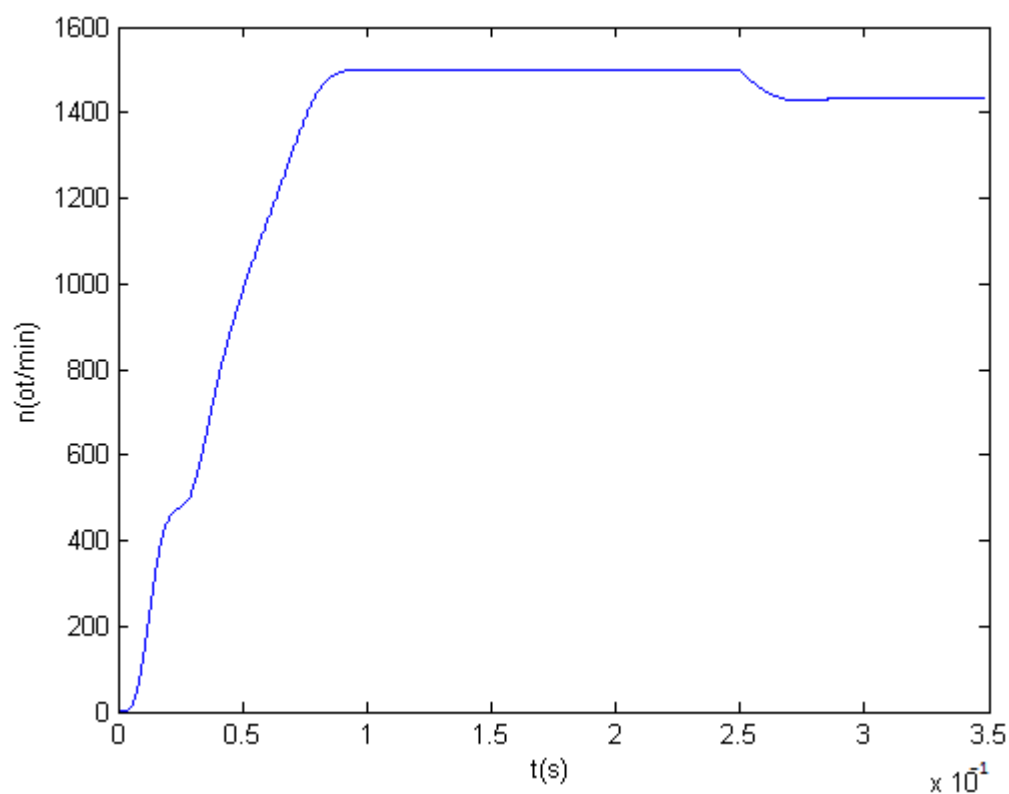
Obrázek 6.34 Průběhy statorového napětí U_{sb}



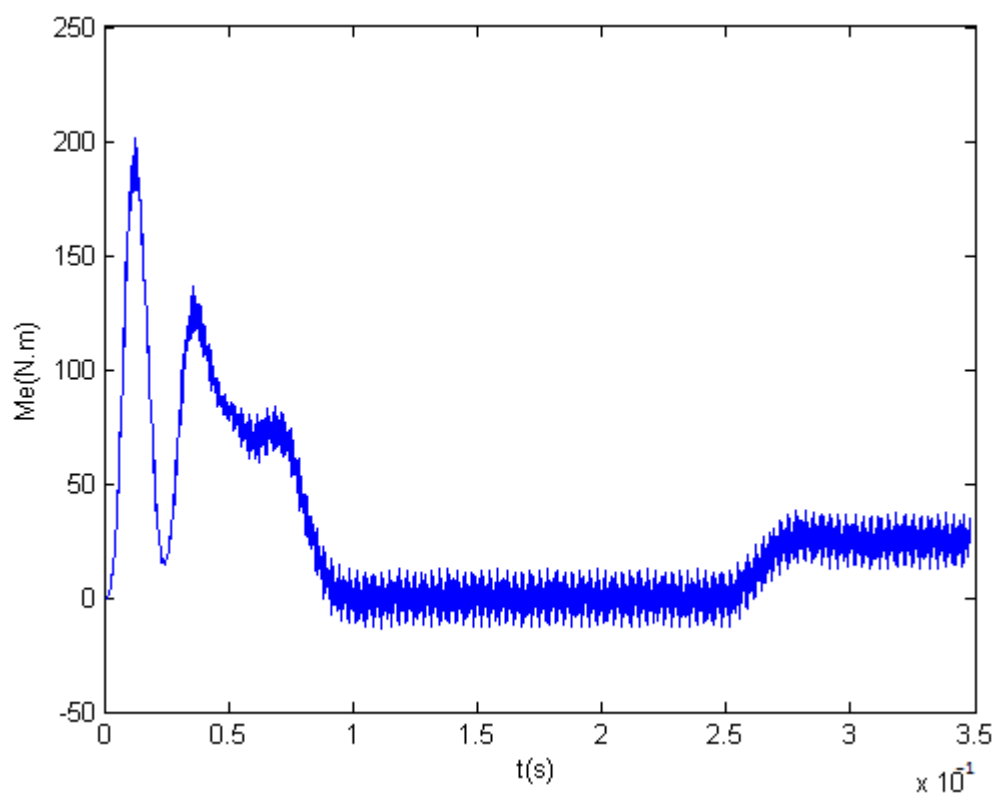
6.5 Průběhy při zatížení

Aby bylo vidět jak se změní tvar průběhů při zatížení, v simulaci jsem zvolil přivedení momentu M_{pm} a nastavil ho na hodnotu 25 N.m. Tímto momentem jsem pak zatěžoval oba typy motorů a to jak při napájení ze střídače s pulsní šířkovou modulací, tak i při obdélníkovém řízení střídače. Abych zde nedával opět znovu všechny průběhy, zvolil jsem vždy jen jeden průběh otáček a momentu od jednoho či druhého typu asynchronního motoru při určitém napájení a jeden průběh proudu, jelikož jejich tvar byl opět ve všech případech totožný. U všech průběhů si můžeme pak všimnout, jak přivedený moment má vliv na výsledné výstupní charakteristiky. S předstihem můžeme říct, že ve všech případech změní moment výsledné hodnoty parametrů a tvary průběhů.

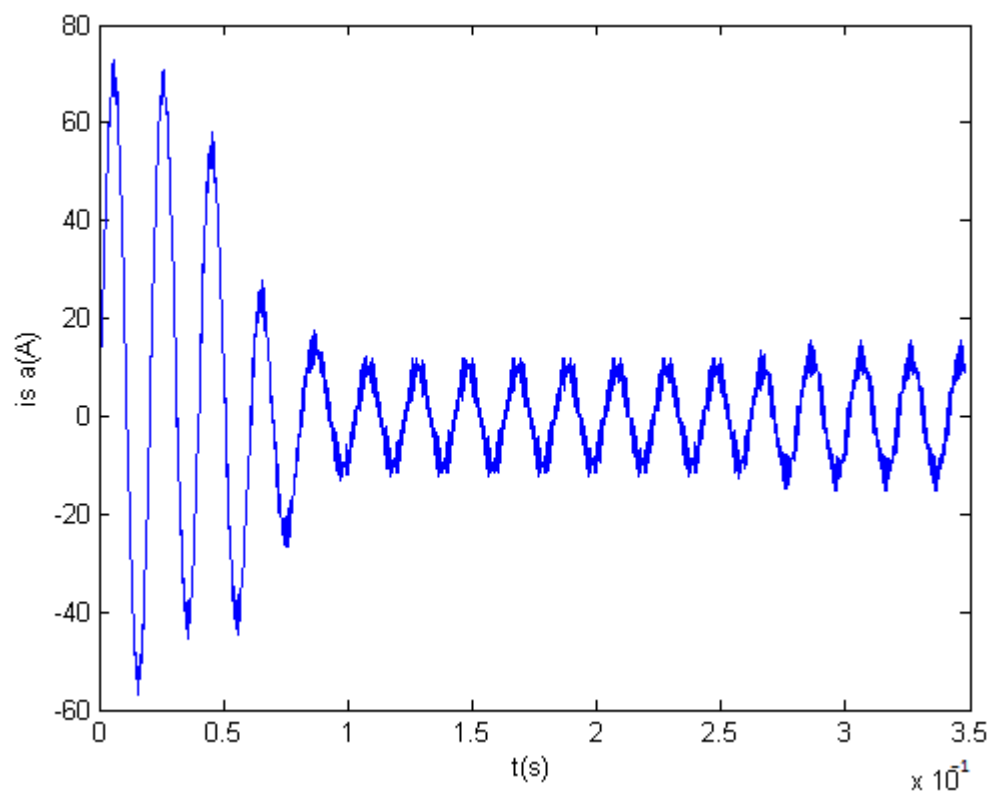
6.5.1 Průběhy při zatížení – napájení pomocí PWM



Obrázek 6.36 Průběh otáček při zatížení

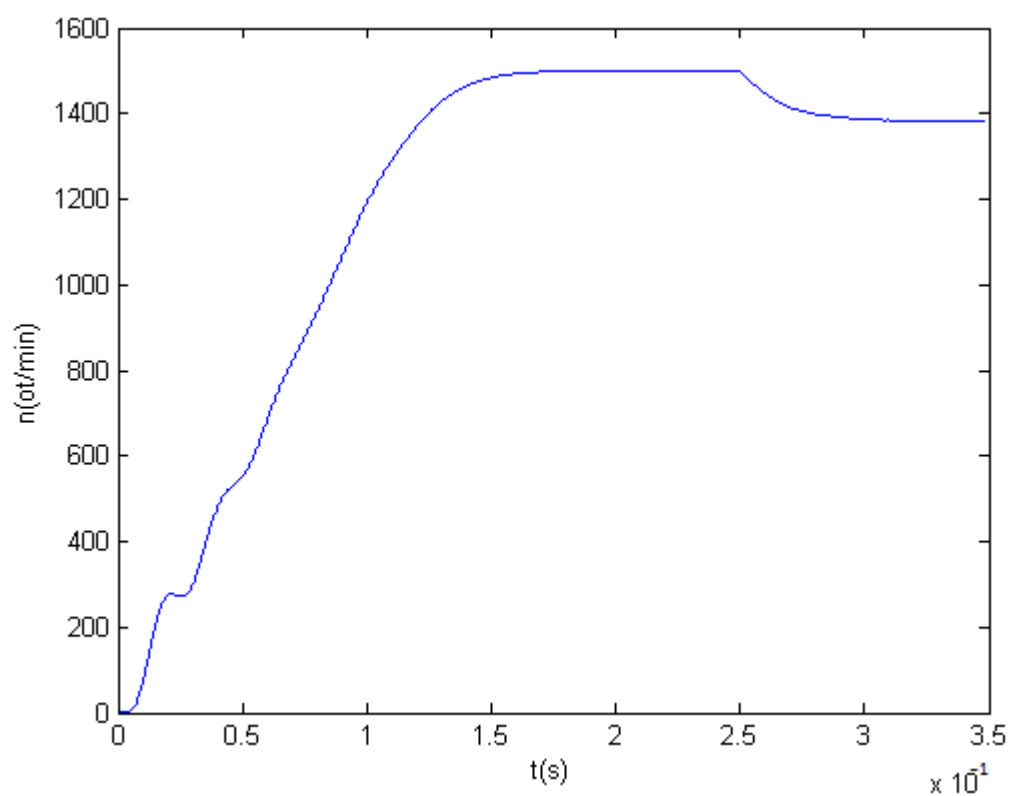


Obrázek 6.37 Průběh momentu při zatížení

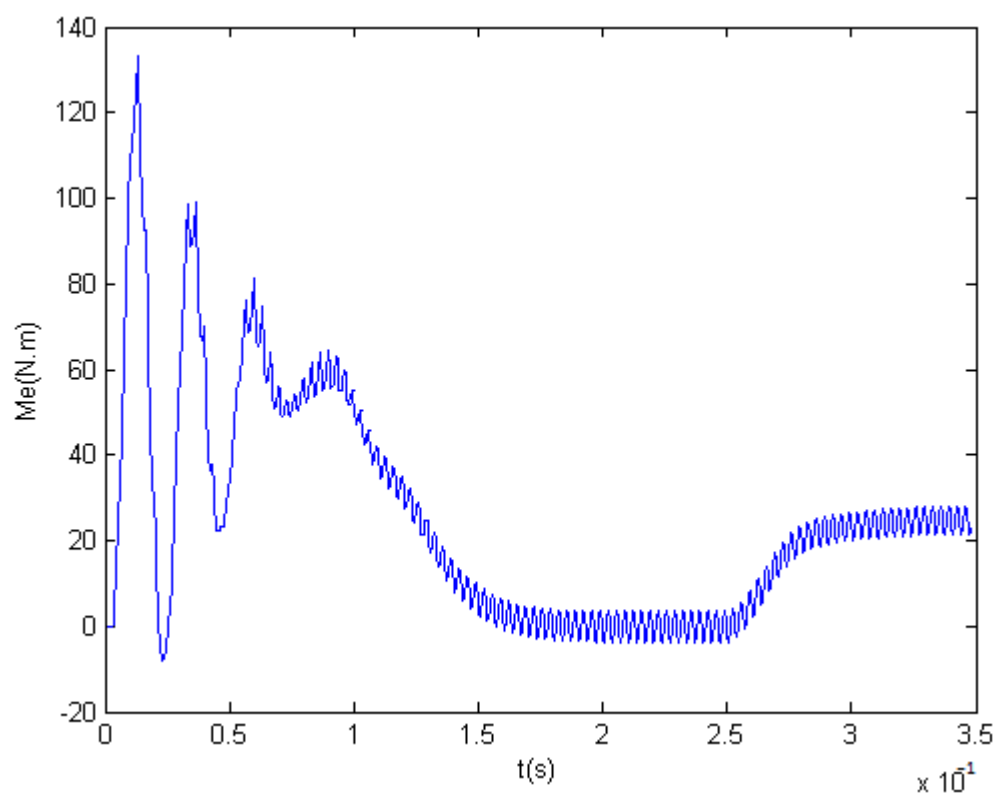


Obrázek 6.38 Průběh statorového proudu i_{sa} při zatížení

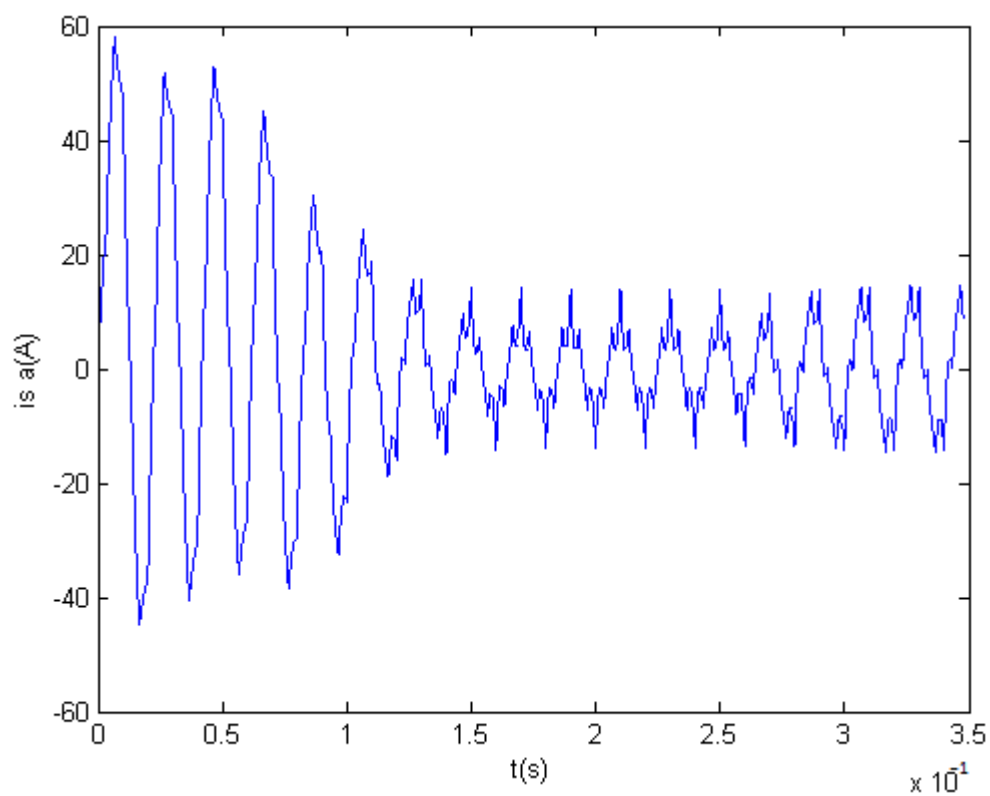
6.5.2 Průběhy při zatížení – napájení pomocí obdélníkového řízení



Obrázek 6.39 Průběh otáček při zatížení



Obrázek 6.40 Průběh momentu při zatížení



Obrázek 6.41 Průběh statorového proudu i_{sa} při zatížení

6.6 Zhodnocení simulací

Simulace se vždy prováděla při dvou typech napájení ze střídače, a to při pulsní šířkové modulaci a při obdélníkovém řízení. Při simulaci byl používán mnou vytvořený blok trojsložkový model asynchronního motoru, dvousložkový model byl pak použitý už před vytvořením modelu.

Čas trvání simulací byl nastaven na 0,35 sekund, aby šly dobře vidět tvary jednotlivých průběhů. Pak taky proto, aby bylo možné celkem často provádět změny zadávaných parametrů a opětovně tak spouštět simulaci, jelikož při nastavení simulačního času nad 0,5 sekund při obdélníkovém řízení, trvala jedna simulace i přes patnáct minut, často pak celý program zamrzl a hlásil chybovou hlášku s upozorněním na nedostatek operační paměti.

Výstupní průběhy byly zobrazovány pro dvojsložkový model (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , i_{sa} , i_{sb} , n a M_e) a pro trojsložkový model (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , n a M_e).

Při napájení pomocí PWM mají všechny průběhy statorových proudů i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} stejný tvar a i velikost a to jak pro dvojsložkový, tak i pro trojsložkový model. Lze si všimnout, že při rozběhu na synchronní otáčky v čase $t = 0$ až 0,1 s je hodnota statorových proudů několikanásobně vyšší než hodnota proudů při dosažených synchronních otáčkách ($t = 0,1$ až 0,35). Stejně jsou pak i průběhy pro otáčky motoru n a momentu motoru M_e . U průběhu otáček (**obrázek 6.8 a 6.13**) je patrné jak se motor roztáčí na synchronní otáčky $n = 1500$ ot/min. Moment není při rozběhu nulový, ale kolem této hodnoty se ustálí po dosažení synchronních otáček (**obrázek 6.7 a 6.12**). Nulový je proto, že není přivedeno žádné zatížení (parametr M_{pm}).

Při obdélníkovém řízení pak můžeme opět pozorovat stejné tvary a velikosti všech statorových proudů (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}). Oproti PWM se proudy liší tvarem, což je podle teoretických předpokladů správně (**obrázky 6.16 až 18 a 6.22 až 6.24**). U tohoto typu řízení si lze všimnout, že rozběh trval déle, oproti napájení za pomoci PWM. I zde se otáčky ustálily v obou případech modelů na hodnotě 1500 ot/min a i moment se po ustálení pohyboval kolem nulové hodnoty (**obrázek 6.20 a 6.25**). Z výše uvedených poznatků, jsme tak došli k závěru, že při jednotném napájení se tvary a zejména hodnoty proudů, u těchto dvou modelů motoru, neliší. Abychom tyto poznatky potvrdili, měřili jsme efektivní hodnoty všech proudů a tyto hodnoty jsme pak vynesli do **tabulky 6.3**. Z tabulky je patrné, že jsou hodnoty efektivních proudů stejné při stejném druhu napájení obou modelů (hodnoty se liší jen v miliampérech).

V **kapitole 6.4** jsou pak uvedeny detailní průběhy při jednotlivých napájení. Pro dvojsložkový model jsou uvedena obě složky napětí U_{sa} a U_{sb} , jelikož se od sebe liší. Pro trojsložkový model je pak uveden vždy jen jedna fáze napájecího napětí, jelikož ty jsou stejné a liší se od sebe pouze fázovým posunutím. Tvary proudů (**obrázek 6.32 a 6.36**) pak odpovídají teorii o tvaru proudu při napájení ze střídače pomocí PWM a obdélníkovém řízení.

Aby bylo vidět, jak se změní průběhy při zatížení, nastavil jsem hodnotu M_{pm} na 25 Nm. Motor se rozbíhal bez zatížení a při čase $t = 0,25$ s se oba modely skokově zatížily 25 Nm. Průběhy při zatížení jsou pak uvedeny v **kapitole 6.5**. Při zatížení je patrný vliv na charakteristiky, změny tvar proudů (zvětší se jejich efektivní hodnota), klesnou otáčky (přibližně na 1380 ot/min při obdélníkovém řízení a na 1433 při PWM) a zvýší se i hodnota momentu motoru (pohybuje se kolem nastavené hodnoty 25 Nm).

7 Závěr

Tato diplomová práce se věnovala především sestavení trojsložkového modelu asynchronního motoru a následnému porovnávání veličin dvojsložkového a trojsložkového modelu (při stejném druhu napájení).

Nejprve byly přijaty obecné předpoklady pro vytvoření modelu a naznačena i možnost řešení pomocí tokového modelu. Práce se však zabírala proudovým modelem a tak byly převzaty rovnice pro proudový trojsložkový model a přiblížen jejich význam. Kromě rovnic přímo pro model, jsme museli uvažovat i s použitím rovnic Parkovy transformace, jelikož ta byly v simulaci pak nezbytná. Motor měl vstupní parametry nastaveny podle **tabulky 4.1**.

Následovala tvorba hlavního bodu, a to vytvoření vnitřní struktury. Přiblížení vytváření vnitřní struktury, je naznačeno v **kapitole 4.2.1**.

Další část práce se týkala vytvoření bloku napájení, konkrétně střídače s obdélníkovým řízením a následně i pulsní šířkové modulace. Při tvorbě střídače se v obou případech použil blok Matlab Function Embedded do kterého šel přímo vepsat vytvořený program podle algoritmu.

Části ohledně vytvoření a řešení napájení se věnuje **kapitola 5**.

Po vytvoření všech bloků a sestavení výsledných simulačních schémat (**obrázky 6.1 a 6.14**) se přešlo k samotným simulacím. Výstupní hodnoty tvořily u obou modelů veličiny i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , n a M_e . U dvojsložkového pak navíc byly zobrazovány proudy i_{sa} , i_{sb} , jelikož se od sebe lišily a vycházelo se z nich pro transformaci 2/3. Ze všech průběhů proudů lze pak vyčíst, že jsou průběhy totožné pro oba typy modelů motoru, což je velice důležitý poznatek z mé práce.

Dalším zajímavým a důležitým poznatkem je, že i když se liší u dvojsložkového modelu složka α a β , tak po transformaci 2/3 je tvar a hodnota všech proudů stejná. Taktéž lze vizuálně zjistit, několikanásobné zvětšení proudu při rozběhu.

Tvary proudů se pak liší podle použité metody napájení a v obou případech odpovídají teoretickým předpokladům.

Aby se potvrdilo, že hodnoty statorových proudů jsou stejné u obou modelů při jednotlivém napájení, bylo v simulaci provedeno měření efektivních hodnot těchto proudů. Neměřené hodnoty jsou pak uvedeny v **tabulce 6.3** a potvrzují tak, že hodnoty statorových proudů jsou stejné.

Pro potvrzení správné funkce střídačů jsou zobrazena jednotlivá napájecí napětí v detailech. V detailu jsou i uvedeny statorové proudy, aby šla lépe pozorovat změna tvaru, při různém napájení.

Při poslední simulaci byly simulační modely zatíženy v čase $t = 0,25s$ hodnotou 25Nm. Na zobrazených průbězích pak lze pozorovat pokles otáček, zvýšení výstupního momentu M_e a změna tvaru proudu.

Jako další možnost se zde nabízí sestavení tokového modelu, který je tvořen pomocí matic, a porovnání výstupních hodnot se zde uvedenými dvěma modely asynchronního motoru. Případně je možná další změna napájení a opětovné porovnávání a srovnávání výstupních průběhů.

Použitá literatura

- [1] FIRAGO, B.I., PAVJAČIK, L.B.: *Těorija elektroprivoda*. ZAO „Těchnoperspektiva“ Minsk 2004. ISBN 985-6591-20-1
- [2] FIRAGO, B.I., PAVJAČIK, L.B.: *Regulirujemyje elektroprivody pėremėnnogo toka*. ZAO „Těchnoperspektiva“ Minsk 2006. ISBN 985-6591-37-6
- [3] ČERNÝ M.: *Elektrické pohony* II VUT Brno 1979
- [4] KOCMAN S. *Asynchronní stroje* [online]. 2002
URL:< <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>>
- [5] Neborák I. *Pohony s asynchronními motory* [online]. 2009
< http://feil.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/MaSEP/kap2_38-78.pdf >
- [6] Neborák I. *Modelování a simulace měničů kmitočtu* [online]. 2006
<<http://feil.vsb.cz/kat430/data/mases/MaS%20MS4%20menice%20kmitoctu.pdf>>
- [7] Neborák I. *Asynchronní (indukční) stroje motory* [online]. 2009
URL:<http://feil.vsb.cz/kat430/data/mech/prednasky/MS_motory%20asynchronni.pdf>
- [8] The MathWorks, Inc. Matlab [počítačový program]. Version 7.8 (R2009a) for Windows. Natick (Massachusetts, US).